



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAPAS DE
PROTECCIÓN (LOPA) EN EL ANÁLISIS DE
RIESGOS DE PROCESO”**

Trabajo Monográfico de Actualización

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

ISAAC ALEJANDRO AGUILAR DÁVILA



MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: ISAIAS ALEJANDRO ANAYA Y DURAND
VOCAL: RAMON EDGAR DOMINGUEZ BETANCOURT
SECRETARIO: MARTIN RIVERA TOLEDO
1er. SUPLENTE: ILEANA RODRIGUEZ CASTAÑEDA
2° SUPLENTE: ALMA DELIA ROJAS RODRIGUEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INTERNATIONAL FIRE SAFETY CONSULTING DE MÉXICO. S.A. DE C.V.

ASESOR DEL TEMA

ING. RAMÓN E. DOMÍNGUEZ BETANCOURT

SUSTENTANTE

ISAAC ALEJANDRO AGUILAR DÁVILA

OBJETIVOS.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. ANÁLISIS DE RIESGOS EN PROCESOS	13
1.1. ¿Qué es el Análisis de Riesgo en Procesos?	13
1.2. Identificación de Peligros y Riesgos	15
1.3. Análisis de Consecuencias	16
1.4. Análisis de Frecuencias.....	17
1.5. Caracterización y Jerarquización de Riesgos	18
1.6. Metodologías de Análisis de Riesgos	21
1.6.1. Análisis Cualitativos.....	21
1.6.2. Análisis Semicuantitativos	22
1.6.3. Análisis Cuantitativos	22
1.7. Control de Riesgos de Proceso	23
1.8. Informe del Análisis de Riesgo de Proceso.....	24
2. MARCO NORMATIVO NACIONAL	26
2.1. Referente a la Seguridad e Higiene en las Instalaciones.....	26
2.2. Referente al Medio Ambiente	29
2.3. Tratados	31
3. EMPLEO DEL LOPA EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS DE PROCESO	31
3.1. ¿Qué es el LOPA?.....	31
3.2. Limitaciones del LOPA.....	35
3.3. Beneficios	36
4. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS CON LOPA.....	36
4.1. Estimación de las consecuencias y la gravedad	36
4.1.1. Método 1: Método de la Categoría sin Referencia Directa al Daño Humano	38
4.1.2. Método 2: Estimaciones Cualitativas con Daño Humano.....	39
4.1.3. Método 3: Estimaciones Cualitativas con Daño Humano con Ajustes para Probabilidades post-descarga.....	39
4.1.4. Método 4: Estimaciones Cuantitativas con Daño Humano.....	40

4.2. Desarrollo de Escenarios	40
4.2.1. <i>Identificar Candidatos de Escenarios</i>	41
4.2.2. <i>Desarrollo del escenario</i>	42
4.3. Identificación de la Frecuencia del Evento Inicial	45
4.3.1. <i>Tipos de eventos iniciales</i>	45
4.3.2. <i>Estimación de la Frecuencia</i>	47
4.3.3. <i>Selección de Índices de Falla en el LOPA</i>	48
4.3.4. <i>Ajuste de índices de Frecuencia</i>	48
4.4. Identificación de las Capas de Protección Independientes	49
4.4.1. <i>Características de las diversas salvaguardas</i>	50
4.4.2. <i>Requerimientos de las salvaguardas para ser consideradas IPL's</i>	52
4.4.3. <i>Evaluaciones y características de las IPL's en el LOPA</i>	58
4.4.4. <i>Valor de la PFD</i>	60
4.4.5. <i>Ejemplos de IPL's</i>	61
4.4.6. <i>Comparación entre IPL's Preventivas e IPL's de Mitigación</i>	67
4.5. Determinación de la Frecuencia de Escenarios	68
4.5.1. <i>Cálculo Cuantitativo del Riesgo y de la Frecuencia</i>	68
4.5.2. <i>Determinación del Riesgo o Frecuencia del escenario por medio de Tablas de Búsqueda</i>	74
4.5.3. <i>Cálculo del Riesgo o Frecuencia con Logaritmos Enteros</i>	75
4.6. Tomando decisiones de Riesgos usando LOPA	76
4.6.1. <i>Métodos matriciales</i>	78
4.6.2. <i>Método de Criterios Numéricos (Riesgo Máximo Tolerable por Escenario)</i>	78
4.6.3. <i>Número de Créditos IPL</i>	79
4.6.4. <i>Juicio de Expertos</i>	80
4.6.5. <i>Análisis Costo-Beneficio para comparar Alternativas</i>	80
4.6.6. <i>Criterios de Riesgo Acumulado frente a Criterios de Escenario</i>	80
5. APLICACIÓN DEL MÉTODO LOPA	81
6. CONCLUSIÓN	98
ANEXO A. CRITERIOS DE TOLERANCIA AL RIESGO	99
ANEXO B. VALORES DE FRECUENCIA PARA EVENTOS INICIALES	102
ANEXO C. SALVAGUARDAS QUE NO SE CONSIDERAN IPL'S	103
ANEXO D. VALORES DE PROBABILIDAD DE FALLA EN LA DEMANDA (PFD) PARA ALGUNAS IPL'S	104
GLOSARIO	107
REFERENCIAS	113
BIBLIOGRAFÍA	1136

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AAR	Actividades Altamente Riesgosas
AIChE	Instituto Norteamericano de Ingenieros Químicos
ALARP	Tan Bajo como Razonablemente Factible
ANIQ	Asociación Nacional de la Industria Química
API	Instituto Norteamericano del Petróleo
ASME	Sociedad Norteamericana de Ingenieros Químicos
BLEVE	Explosión de Vapor en Expansión por Líquido en Ebullición
B.P.	Punto de Ebullición
BPCS	Sistema de Control de Proceso Básico
C	Factor de consecuencia, relacionado con la magnitud de la severidad
CCF	Falla de Causa Común
CCPS	Centro para la Seguridad del Proceso Químico, del Instituto Norteamericano de Ingenieros Químicos
CEI	Índice de Exposición Química de la empresa Dow
COA	Cédula de Operación Anual
QRA	Evaluación Cuantitativa del Riesgo
CW	Agua de enfriamiento
<i>D</i>	Número de veces que un componente o sistema se desafía (hr^{-1} o año^{-1})
DCS	Sistema de Control Distribuido
DGIRA	Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental
DGGIMAR	Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
ERA	Evaluación de Riesgos Ambientales
ERPG	Guía de Planeación para Respuesta de Emergencia
ETA	Análisis de Árbol de Eventos
EuReData	Datos Europeos de Confiabilidad (serie de conferencias)
<i>F</i>	Factor de Falla (hr^{-1} o año^{-1})

<i>f</i>	Frecuencia (hr^{-1} o año^{-1})
F&EI	Índice de Fuego y Explosión de la empresa Dow
F / N	Frecuencia de Fatalidad contra Número Cumulativo
FCE	Elemento Final de Control
FMEA	Modos de Falla y Análisis de Efecto
FTA	Análisis de Árbol de Fallas
HAZOP	Estudio de Riesgo y Operabilidad
HE	Evaluación del Riesgo
HRA	Análisis de Confiabilidad Humana
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
IPL	Capa de Protección Independiente
ISA	La Sociedad de Instrumentación, Sistemas y Automatización (anteriormente, Sociedad de Instrumentos de Norteamérica)
LAH	Nivel de Alarma – Alto
LAU	Licencia Ambiental Única
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LI	Indicador de Nivel
LIC	Indicador de Nivel – Control
LFL	Límite Inferior de Inflamabilidad
LOPA	Análisis de Capas de Protección
LOTO	Bloqueo y Etiquetado
LT	Transmisor de Nivel
MAWP	Presión Máxima de Trabajo Permitida
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental
N_2	Nitrógeno
NMX	Normas Mexicanas
OIT	Organización Internacional del Trabajo
OSBL	Fuera del Límite de Batería
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (EE.UU.)

OREDA	El Proyecto de Datos de Confiabilidad Costa fuera (<i>offshore</i>)
$P^{fatality}$	Probabilidad de Fatalidad
$P^{ignition}$	Probabilidad de Ignición
$P^{person\ present}$	Probabilidad de Persona Presente
P	Probabilidad
P&ID	Diagrama de Instrumentación y Tuberías
PFD	Probabilidad de Falla en la Demanda
PHA	Análisis de Riesgo en el Proceso
PI	Indicador de Presión
PL	Capa de Protección
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
PPA	Programa para la Prevención de Accidentes
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PSV	Válvula de Seguridad (Válvula de Alivio de Presión – o de Escape)
PVGA	Programa Voluntario de Gestión Ambiental
R	Riesgo
RV	Válvula de Alivio
SARI	Sistema de Administración en Responsabilidad Integral
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIF	Función Instrumentada de Seguridad
SIL	Nivel de Integridad de Seguridad
SIRG	Sistema Integrado de Regulación Directa y Gestión Ambiental para la Industria
SIS	Sistema Instrumentado de Seguridad
T	Intervalo de Prueba para el Componente o Sistema (horas o años)
XV	Activado Remotamente/Válvula Controlada

FIGURAS Y TABLAS

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1. Ciclo de la Administración del Riesgo
- Figura 2. Etapas del Análisis de Riesgos en Procesos
- Figura 3. Consecuencias adversas derivadas de los riesgos del proceso
- Figura 4. Técnicas para la estimación de Frecuencias
- Figura 5. Principio ALARP
- Figura 6. Matriz de Riesgos
- Figura 7 Organigrama de una Evaluación Cuantitativa del Riesgo
- Figura 8. Espectro de herramientas para la toma de decisiones basada en el riesgo
- Figura 9. Capas de defensa contra un posible accidente
- Figura 10. El ciclo de vida del proceso mostrando dónde se usa normalmente el LOPA
- Figura 11. Comparación del LOPA y el análisis de árbol de eventos
- Figura 12. Cómo funciona el LOPA
- Figura 13. Consecuencias potenciales a partir de la descarga de material inflamable/toxico
- Figura 14. Requerimientos mínimos para un escenario
- Figura 15. Diagrama de flujo para el desarrollo de escenarios por LOPA
- Figura 16. Tipos de eventos iniciales
- Figura 17. Ejemplo de IPL no independiente del evento inicial
- Figura 18. Elementos de sensor común y resolovedor lógico en lazo BPCS utilizando el Método A
- Figura 19. Componentes básicos de una IPL activa
- Figura 20. Ejemplo de árbol de decisión para probabilidad de ignición para vapor inflamable
- Figura 21. Desbordamiento de Tanque de Compensación de hexano
- Figura 22. Desbordamiento de Tanque de Compensación de Hexano (con IPL añadido)
- Figura 23. Efecto de una IPL que falla en operar como se pretendía
- Figura 24. Evento inicial y habilitador coincidente
- Figura 25. Escenario de un reactor tipo batch

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 1. Criterios de aceptabilidad de riesgo
- Tabla 2. Criterios de Consecuencias
- Tabla 3. Criterios de Frecuencias
- Tabla 4. Niveles de Riesgo
- Tabla 5. Metodologías y Etapas de Análisis de Riesgo de Proceso
- Tabla 6. Metodologías de Análisis de Riesgo y Etapas de Vida de un Proceso
- Tabla 7. Ejemplo de Hoja Resumen para la Documentación del Escenario LOPA y sus cálculos
- Tabla 8. Créditos de IPL
- Tabla 9. Ejemplo de Matriz de Riesgos con Zonas de Acción Individuales
- Tabla 10. Número de Créditos IPL Requeridos para diversas Frecuencias
- Tabla 11. HAZOP para elegir el escenario
- Tabla 12. Categorización de Consecuencias (Matriz de Riesgos)
- Tabla 13. HAZOP previo a la evaluación por el Método LOPA
- Tabla 14. Matriz de riesgos con zonas de acción individuales
- Tabla 15. Hoja resumen para el ejemplo, empleando el método de criterios numéricos y el método de criterios de frecuencia de fatalidad para las consecuencias
- Tabla A-1. Consecuencias en forma descriptiva
- Tabla A-2. Tabla para estimar la frecuencia de ocurrencia de los eventos en forma descriptiva
- Tabla A-3. Tabla para estimar la frecuencia de ocurrencia de los eventos en forma gráfica
- Tabla A-4. Datos típicos relacionados con criterios de tolerancia al riesgo
- Tabla B-1. Valores típicos de frecuencia, f , asignados para eventos iniciales
- Tabla C-1. Ejemplos de salvaguardas que usualmente no se consideran IPL's
- Tabla D-1. IPL's Pasivas
- Tabla D-2. IPL's Activas
- Tabla D-3. IPL's para Acción Humana

OBJETIVOS

Objetivo General

En el presente trabajo monográfico de actualización tiene como objetivo principal describir el Análisis de Capas de Protección (LOPA) como una herramienta simplificada, para analizar y evaluar los riesgos en cualquier parte del ciclo de vida de los diversos procesos industriales.

Objetivos Particulares

- Puntualizar los elementos que forman parte del método LOPA y su funcionamiento.
- Mencionar algunas de las técnicas más empleadas, para llevar a cabo estudios de riesgo.
- La importancia de estudios de riesgo en los procesos para el cumplimiento del marco normativo nacional o de tópicos voluntarios para ciertas instalaciones.
- Describir las limitaciones y beneficios del método en cuestión.
- Ejemplificación del método.

INTRODUCCIÓN

Todo proceso industrial y cualquier actividad humana involucran riesgos, sin embargo, por más que el riesgo se reduzca, siempre seguirán existiendo riesgos residuales inevitables.

Por ello, se deben llevar a cabo estudios de riesgo para mitigar y/o prevenir la frecuencia de impactos indeseables y ser administrados de manera correcta, de no hacer esto, las repercusiones podrían ser devastadoras.

En las últimas tres décadas se ha desarrollado en la industria un enfoque distintivo a los peligros y errores que causan la pérdida de la vida y de la propiedad. Esto es comúnmente llamado prevención de pérdidas. Se trata de poner mayor énfasis en las tecnologías de control de riesgos y en tratar de hacer las cosas bien [1].

Actualmente la Seguridad Industrial y la Protección Ambiental son dos disciplinas importantes y complementarias, debido a que se toman en consideración para realizar cualquier proyecto, además la mayor parte de las industrias las han adoptado como parte de su filosofía corporativa.

La gestión de riesgo, proporciona información de suma importancia para tomar decisiones, identificar y recomendar posibles soluciones a problemas que se pueden presentar principalmente en:

- Las instalaciones para ejecutar con mayor seguridad las actividades que se llevan a cabo.
- El equipo empleado por los trabajadores
- El uso y manejo adecuado de los materiales utilizados
- Los procesos
- Los recursos humanos
- Algunos acontecimientos externos inevitables

México, en promedio cada año se registran 346,000 accidentes de trabajo, 5,000 personas se enferman a causa de las labores que realizan y 1,000 mueren desempeñando sus labores o a consecuencia de ellas, según datos del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) [2].

A lo largo de la historia se han reportado fatales accidentes dentro de la industria, los cuales han costado la vida de muchas personas, pérdidas económicas muy considerables y un impacto negativo al medio ambiente.

Sin duda alguna, un ejemplo destacado en la historia de México, es el caso de la explosión de un depósito de gas en San Juanico el 19 de noviembre de 1984, en el Estado de México, ya que puso en evidencia la importancia de desarrollar e implementar la administración de seguridad de los procesos en instalaciones industriales.

Por todo lo anterior, un análisis de riesgo efectivo facilita a las empresas hacer frente a los peligros potenciales que pueden afectar sus diversos intereses.

1. ANÁLISIS DE RIESGOS EN PROCESOS

1.1. ¿Qué es el Análisis de Riesgo en Procesos?

De acuerdo a los Fundamentos para la Dirección de Proyectos y la metodología propuesta por el Project Management Institute en su guía PMBOK, forma parte del ciclo de la Administración de Riesgo.

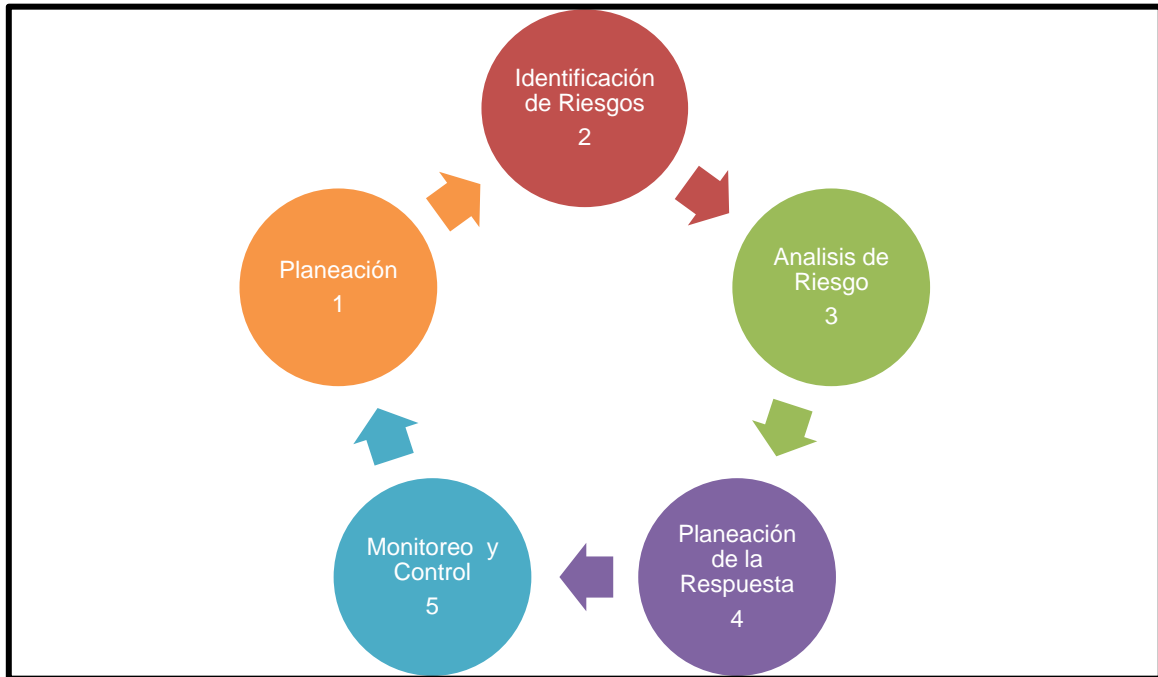


Figura 1. Ciclo de la Administración del Riesgo

Existen diferentes definiciones en la literatura, aunque las más destacadas son:

- El análisis de riesgos de procesos es un enfoque completo, ordenado y sistemático para identificar, evaluar y controlar los riesgos de los procesos relacionados con productos químicos altamente peligrosos. La metodología de análisis de riesgos de procesos debe ser adecuado a la complejidad del proceso y debe identificar, evaluar y controlar los riesgos involucrados en el proceso [3].
- Una evaluación del peligro de amplio alcance que identifica y analiza cualitativamente el impacto de las situaciones de riesgo asociados con un proceso o actividad [4].

- Conjunto de técnicas que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de la ocurrencia de daños asociados a los factores externos (fenómenos naturales, sociales), fallas en los sistemas de control, los sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias a los empleados, a la población, al ambiente, a la producción y/o a las instalaciones [5].
- Trabajo organizado aplicando un método específico para identificar, evaluar y controlar los riesgos significativos asociados con el proceso [6].

El propósito fundamental de esta actividad, es proveer información cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa (según la técnica utilizada) sobre los principales riesgos, su aceptabilidad en la toma de decisiones y planeación, tanto para la prevención como para la eliminación o regulación de los mismos, definiendo los recursos humanos, materiales, tecnología, financiamiento, así como para dar cumplimiento a un requisito legal.

El análisis de riesgos en procesos consta de varias etapas, en la Figura 2 se resumen éstas.



Figura 2. Etapas del Análisis de Riesgos en Procesos

1.2. Identificación de Peligros y Riesgos

Ya que existen riesgos asociados con cualquier actividad en la planta, los analistas no pueden empezar a evaluar dichos acontecimientos hasta saber cuáles son. La identificación de peligros consiste en dos tareas principales:

- 1 Identificación específica de las consecuencias indeseables y
- 2 La identificación de los materiales, sistemas y procesos que puedan producir consecuencias, que repercutan de alguna manera a la organización.

La primera tarea es relativamente fácil, pero es esencial, ya que define el ámbito de aplicación de la segunda tarea. Dentro de las consecuencias específicas indeseables se clasifican en la Figura 3 [4].

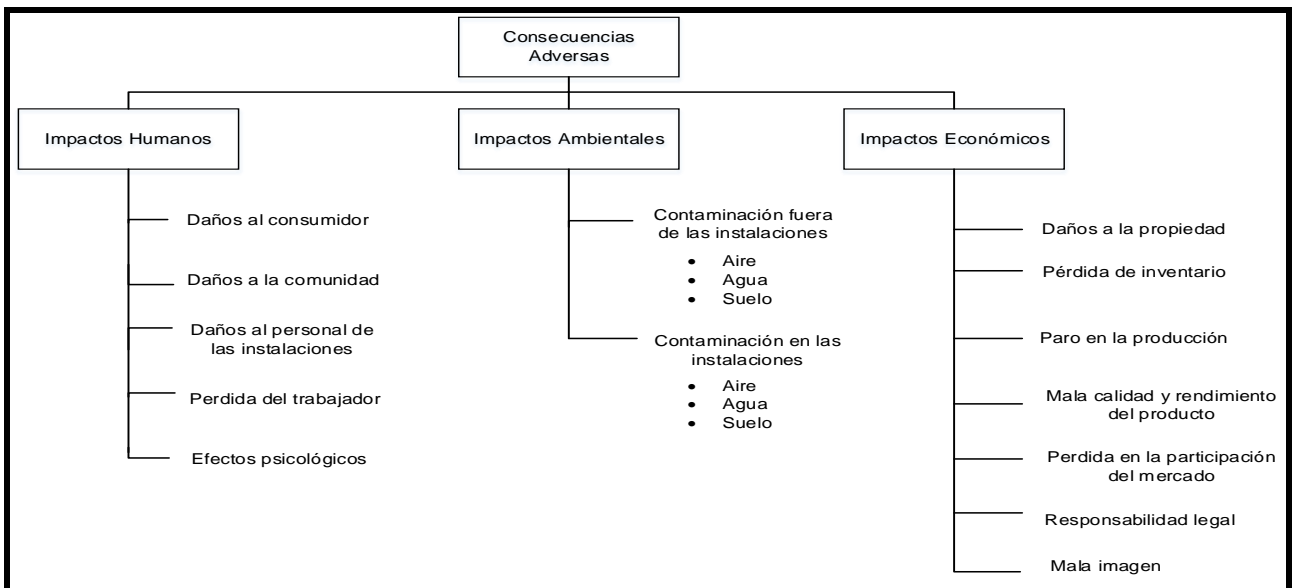


Figura 3. Consecuencias adversas derivadas de los riesgos del proceso

Cada una de estas categorías se pueden subdividir aún más por el tipo de daño (por ejemplo, exposición a tóxicos, exposición térmica, sobrepresión, fuerza mecánica, radiación, descargas eléctricas). Por lo tanto, entre más precisa sea la consecuencia de interés, más fácil será identificar los peligros. Por ejemplo, puede haber un millar de riesgos con impactos humanos, pero sólo dos podrían resultar en lesiones graves fuera de las instalaciones [4].

Una vez definidas las consecuencias de interés, el analista o el equipo que va a llevar dicha actividad puede identificar las características: del sistema, del proceso y de la planta, que pueden ser un peligro de interés. Es esencial que la técnica de

identificación de peligros sea lo suficientemente completa para identificar todos los riesgos importantes. Sin embargo, si el enfoque no proporciona adecuadamente la discriminación entre los peligros más importantes y menos importantes, entonces los intentos posteriores de evaluación de riesgos se verán abrumados por el gran número de peligros potenciales que deben examinarse.

Los métodos más comunes para la identificación de peligros incluyen [4]:

- Análisis de las propiedades de los materiales del proceso y las condiciones del proceso
- Peligros registrados en el historial de incidentes y accidentes tanto propios como en instalaciones o procesos similares
- Tormenta de ideas
- Experiencia que se tenga del proceso
- El desarrollo de matrices de interacción
- Aplicación de algunas metodologías de análisis de riesgos, en particular solo cuatro de ellas, Checklist, ¿Qué pasa si?, ¿Qué pasa si?/ Checklist y HAZOP

1.3. Análisis de Consecuencias

Esta etapa constituye un aspecto cualitativo de la estimación del impacto o daño de un determinado escenario o evento. Normalmente estas evaluaciones incluyen las condiciones y cantidades de fugas o derrames; áreas afectadas, daño a la imagen-reputación y efectos sobre la seguridad y la salud de las personas.

Es importante resaltar que pueden existir diferentes fenómenos para ser considerados consecuencias, no solo las mencionadas, esto va depender de las necesidades de cada instalación y el objetivo del análisis de riesgo del proceso.

El Centro para la Seguridad del Proceso Químico (CCPS) una junta directiva del AIChE considera los siguientes fenómenos [7]:

- Fuga de gas a baja o alta presión
- Dispersión de nubes de gas formado
- Explosiones e incendios
- BLEVES

- Incendios de charco
- Dispersión Tóxica
- Derrames
- Exposición

Una buena estimación de las consecuencias, puede determinar a su vez la probabilidad y la secuencia de los eventos.

Se pueden englobar en tres modelos distintos para su estimación [7]:

- Modelos de Origen
- Explosiones e Incendios
- Modelos de Efectos

Además, existen modelos de simulación de consecuencias por medio de Software, éste debe seleccionarse de manera adecuada, ya que un mismo evento puede tener diferentes evoluciones, por ejemplo, dado un derrame, puede conllevar a un incendio; que su vez puede causar o evitarse una explosión. Cada caso proporciona una estimación cuantitativa de las consecuencias de los factores considerados para el estudio.

Actualmente existen en el mercado varios Software algunos de ellos son:

- ALOHA
- ARCHIE
- PHAST
- SIRIA
- CONFEX
- MUDAN
- SOPRANO
- LIUTO

1.4. Análisis de Frecuencias

Consiste en estimar la frecuencia con que los eventos identificados y seleccionados pudieran presentarse, este análisis se realiza considerando los eventos iniciadores bajo criterios cualitativos y cuantitativos.

Las metodologías empleadas para dicha estimación son:

- Registros de incidentes de la misma organización o de otras instalaciones (siempre y cuando sea el mismo evento o similar)
- Análisis de árbol de fallas
- Metodología de árbol de eventos
- Distribución exponencial
- Distribución normal
- Distribución Tipo Weibull
- Uso de software (por ejemplo BestFit)

El CCPS organiza las técnicas para la estimación de frecuencias como se ilustra a continuación [8].

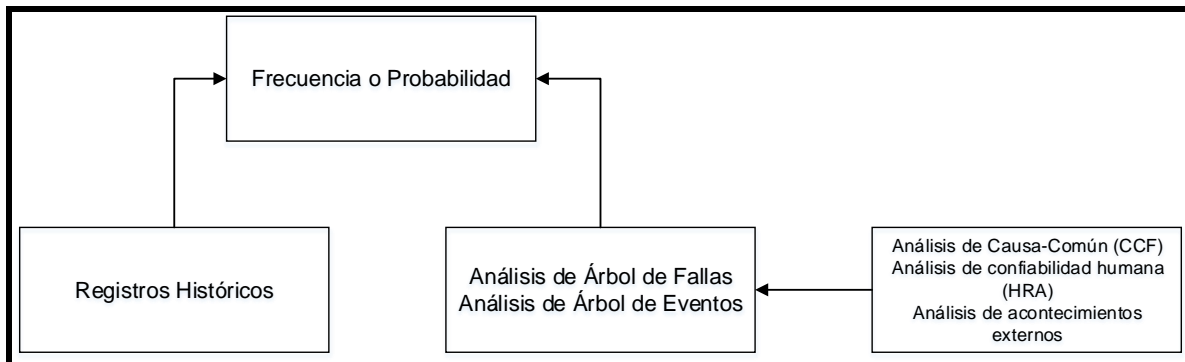


Figura 4. Técnicas para la estimación de Frecuencias

1.5. Caracterización y Jerarquización de Riesgos

Consta en calificar los riesgos identificados con base a la frecuencia de ocurrencia y severidad de las consecuencias, con la finalidad de determinar la ubicación en matrices de riesgos, ya que los cuadrantes de las matrices establecen el nivel de importancia, ayudando esto a establecer toma de decisiones y acciones, así también, contribuyen a identificar los riesgos de proceso como no tolerables para alcanzar niveles Tan Bajo como Razonablemente Factible (ALARP). Este principio se basa en una relación costo-beneficio de la reducción del riesgo tal como se muestra en la Figura 5.

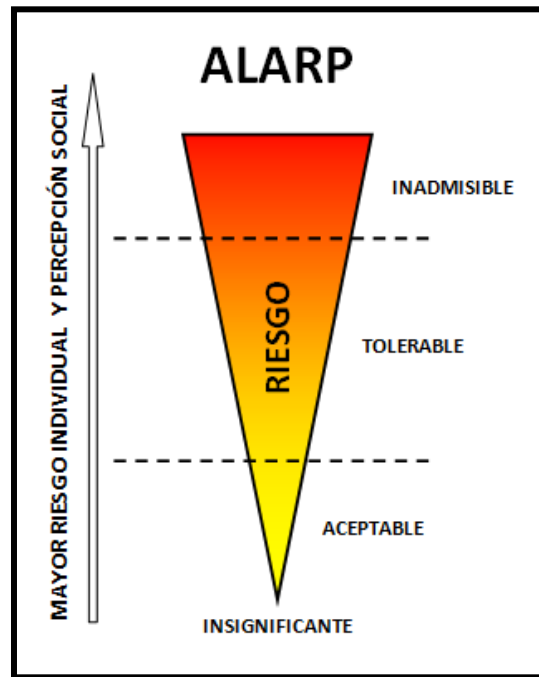


Figura 5. Principio ALARP

Generalmente la caracterización y jerarquización depende de cada empresa, aunque básicamente consta de tener criterios de aceptabilidad de riesgos (consecuencias, probabilidades, costos, niveles de riesgo, frecuencias, etc) [6]. En el anexo A se ilustran algunos de estos criterios.

Una ilustración de este cuarto paso es [6]:

Tabla 5. Criterios de aceptabilidad de riesgo

Aplicación	Ejemplos Cualitativos	Ejemplos Cuantitativos
Aceptabilidad de las consecuencias	Límites de emisión	Niveles de concentración umbrales en los límites de la propiedad
Aceptabilidad de la probabilidad	Componentes de falla sencillos	Frecuencia del evento crítico
Aceptabilidad del riesgo	Matriz de riesgos	Individual y/o criterio de riesgo social
Aceptabilidad del riesgo y el costo	<ul style="list-style-type: none"> •Matriz de riesgo y umbral de costo. •Evaluación matemática de riesgo 	Criterio de costo beneficio.

Tabla 6. Criterios de Consecuencias

Rango de Consecuencia	Criterio Cuantitativo de Consecuencia
Nivel C4	<ul style="list-style-type: none"> •Una o más fatalidades •Lesiones o fatalidades en la comunidad
Nivel C3	<ul style="list-style-type: none"> •Daño permanente en sección localizada del proceso o construcción •Accidentes incapacitantes u hospitalización
Nivel C2	<ul style="list-style-type: none"> •Un accidente incapacitante •Múltiples lesionados
Nivel C1	<ul style="list-style-type: none"> •Un lesionado •Respuestas a emergencia sin lesionados

Tabla 7. Criterios de Frecuencias

Rango de Probabilidades	Criterio Cuantitativo de Frecuencia
Nivel L4	Uno en 10 años
Nivel L3	Uno en 100 años
Nivel L2	Uno en 1000 años
Nivel L1	Menos de uno en 1000 años

Tabla 8. Niveles de Riesgo

Nivel de Riesgo	Descripción Cualitativa de Riesgo
A	Riesgo intolerable: requiere reducción de riesgo
B	Riesgo intolerable: requiere reducción de riesgo o una estimación de riesgo más rigurosa
C	Riesgo tolerable: considera la necesidad de reducción de riesgo
D	Riesgo tolerable: no requiere reducción de riesgo

L4	C	B	A	A
L3	C	B	B	A
L2	D	C	B	B
L1	D	D	C	C
	C1	C2	C3	C4

Figura 6. Matriz de Riesgos

1.6. Metodologías de Análisis de Riesgos

Este tipo de estudios de evaluación por lo general se centran en cuestiones de seguridad en los procesos, posibles fallas en los equipos, los efectos que pueden ocasionar ante emisiones de sustancias químicas al personal de planta o al público, de errores humanos que pueden dar lugar a accidentes y determinar posibles deficiencias en la gestión del programa de seguridad de una organización. La información obtenida puede ser aprovechada para fomentar una relación armónica con el medio ambiente implantando programas para la protección ambiental, es decir garantizar la sustentabilidad en las operaciones.

Dichos estudios se clasifican en:

- Análisis Cualitativos
- Análisis Semicuantitativos
- Análisis Cuantitativos

La elección de una o varias técnicas depende de la complejidad del proceso en cuestión, las características de las instalaciones, la experiencia de los individuos que van a llevar a cabo el análisis, los materiales que se manejan, los recursos con los que se cuentan, la intención del análisis y lo más importante si la organización cuenta con políticas, estándares y criterios de tolerancia al riesgo.

1.6.1. Análisis Cualitativos

Consisten en evaluar el impacto y la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los riesgos identificados, en este proceso se ordenan los riesgos de acuerdo con sus efectos potenciales.

Estas técnicas no se necesitan datos numéricos ni se requieren personas expertas en el manejo de matemáticas o estadística, aunque, se pueden enriquecer con la participación de personas de distintas áreas de la organización.

La mayor parte de los riesgos relacionados con el diseño y operación de las instalaciones que pueden llevar a emisiones accidentales, incendios o explosiones son identificados, controlados o mitigados usando este tipo de métodos, proporcionando a las organizaciones la información necesaria para mejorar la seguridad de sus operaciones [4].

Se enlistan a continuación algunas de las técnicas cualitativas más empleadas.

- Checklist (Lista de verificación)
- What If? (¿Qué pasa si?)
- Hazop (Hazard and Operability Study)
- Análisis de Modo de Falla y Efecto (FMEA)
- Análisis Preliminar de Riesgos
- Análisis Causa-Consecuencia

1.6.2. *Análisis Semicuantitativos*

Se caracterizan por introducir valores a las frecuencias de ocurrencia de un determinado evento y de elegir escenarios con los riesgos más significativos, estas herramientas se utilizan normalmente cuando las consecuencias son demasiado graves para confiar únicamente en el juicio cualitativo.

Las diferentes metodologías de este tipo de análisis se muestran a continuación:

- Análisis de Capas de Protección (LOPA)
- Índice de Fuego y Explosión Dow (F&EI)
- Índice Mond (Fuego, Explosión y Toxicidad)
- Índice de Exposición Química de la empresa Dow (CEI)
- Análisis de Modo de Falla y Efecto cuantificado

1.6.3. *Análisis Cuantitativos*

Pocos de los riesgos son determinados con este tipo de modelos complejos. Es una metodología diseñada para ayudar a evaluar la seguridad global del proceso e identificar en un escenario en particular: áreas para la reducción del riesgo económico y entender el riesgo del comportamiento humano o fallas en el equipo.

Según sea la elección de las diferentes herramientas, el método puede requerir la aplicación de matemáticas o el uso de algún software de simulación.

La Evaluación Cuantitativa del Riesgo (QRA) típicamente consta de siete pasos los cuales se indican en la Figura 7.

Los principales métodos adoptados por las diversas organizaciones son:

- Árbol de Fallas (FTA)
- Árbol de Eventos (ETA)
- Análisis de Confiabilidad Humana (HRA)
- Análisis Causa Consecuencia
- Técnicas Montecarlo

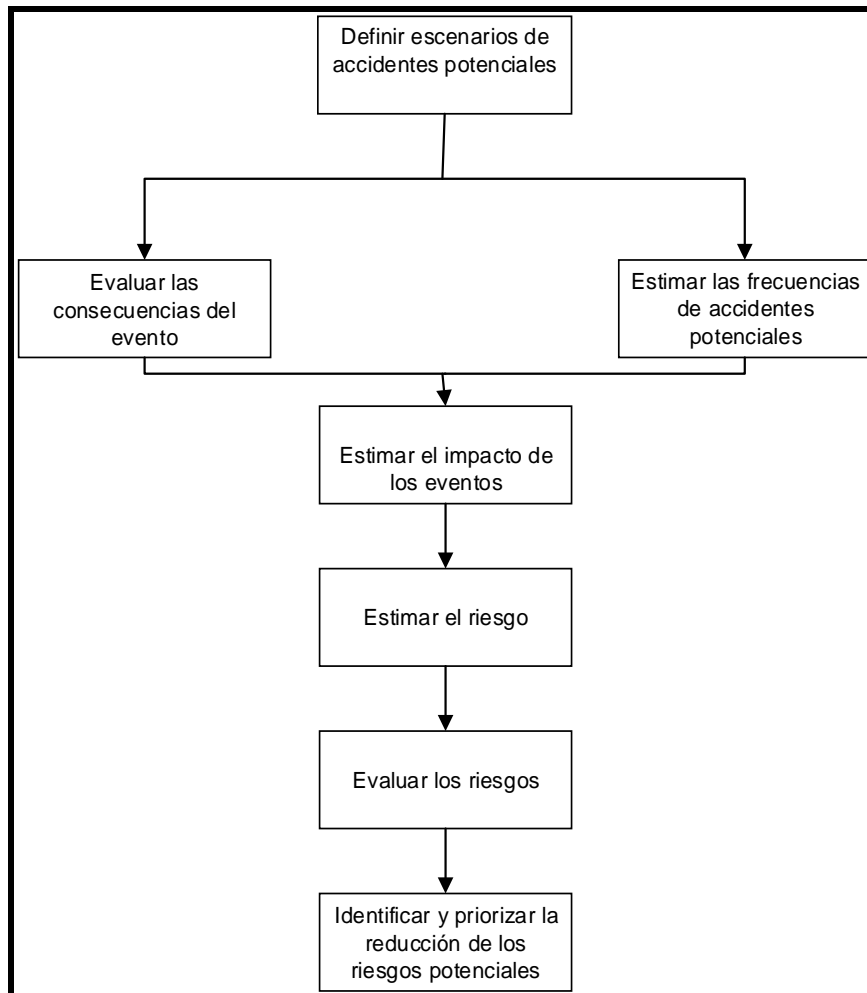


Figura 7 Organigrama de una Evaluación Cuantitativa del Riesgo [8]

En la Tabla 5 se muestran las diferentes metodologías de análisis de riesgo, respecto a las etapas de evaluación de riesgo en los procesos [6], en la Tabla 6 se presenta la relación de las metodologías y las etapas de vida de un proceso [5], por otro lado, en la Figura 8 se ilustra la clasificación de las diferentes metodologías [9].

1.7. Control de Riesgos de Proceso

Dado que los riesgos de un proceso pueden nunca ser reducidos a cero, se tiene que disminuir su probabilidad de ocurrencia, limitando los impactos que pueden

generar, para ello se deben considerar todas las opciones factibles para llegar ALARP, para alcanzar esto se necesitan establecer combinaciones de barreras de protección (salvaguardas).

Las barreras se clasifican en [10]:

- Prevención. Sistemas de contención primaria, sistemas de control de proceso, estructura primaria y secundaria.
- Detección. Sistemas de Control de alarmas, sistemas de detección de incendio/gas/fugas/ entre otros.
- Control y Mitigación. Orientación de equipos y espaciamiento, sistemas de contención secundaria y drenaje, sistemas de protección y supresión de incendios.
- Respuesta a emergencia. Alarmas locales, rutas de escape y evacuación, líneas de comunicación

Cada una de las barreras es una combinación de equipos y dispositivos de proceso, procedimientos documentados, prácticas y costumbres, y habilidades del personal.

1.8. Informe del Análisis de Riesgo de Proceso

Se documentan los riesgos identificados, los escenarios, las consecuencias y las frecuencias estimadas, así como las recomendaciones necesarias para cada riesgo.

Tabla 5. Metodologías y Etapas de Análisis de Riesgo de Proceso

Etapas del Análisis de riesgo	Listas de Verificación	¿Qué pasa sí?	Listas de Verificación - ¿qué pasa sí?	HAZOP	FMEA	Matrices de Riesgo	Árbol de eventos	Árbol de Fallas	Análisis de Consecuencias
Identificación de desviaciones de las buenas prácticas	✓		✓						
Identificación de peligros	✓	✓	✓	✓	✓				
Estimación de consecuencias en el peor de los casos	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
Identificación de oportunidades de reducción de consecuencias				✓	✓	✓			
Identificación de eventos iniciadores y su probabilidad		✓	✓	✓	✓		✓		✓
Identificar oportunidades de reducción de probabilidad de eventos iniciadores								✓	✓
Identificación de eventos secuentes y consecuentes		✓	✓				✓	✓	✓
Estimar la magnitud de los eventos							✓	✓	✓
Evaluación cuantitativa del riesgo							✓	✓	✓

Tabla 6. Metodologías de Análisis de Riesgo y Etapas de Vida de un Proceso

Etapas de Vida del Proceso	Listas de Verificación	¿Qué pasa sí?	Listas de Verificación - ¿qué pasa sí?	HAZOP	FMEA	Matrices de Riesgo	Árbol de eventos	Árbol de Fallas	Análisis de Consecuencias
Investigación y Desarrollo		✓				✓			
Diseño Conceptual	✓	✓				✓			
Operación de planta piloto	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Ingeniería de Detalle	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Construcción / Inicio	✓	✓							
Operación Rutinaria	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Expansión o Modificación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Investigación de Incidentes		✓					✓	✓	✓
Desmantelamiento	✓	✓							

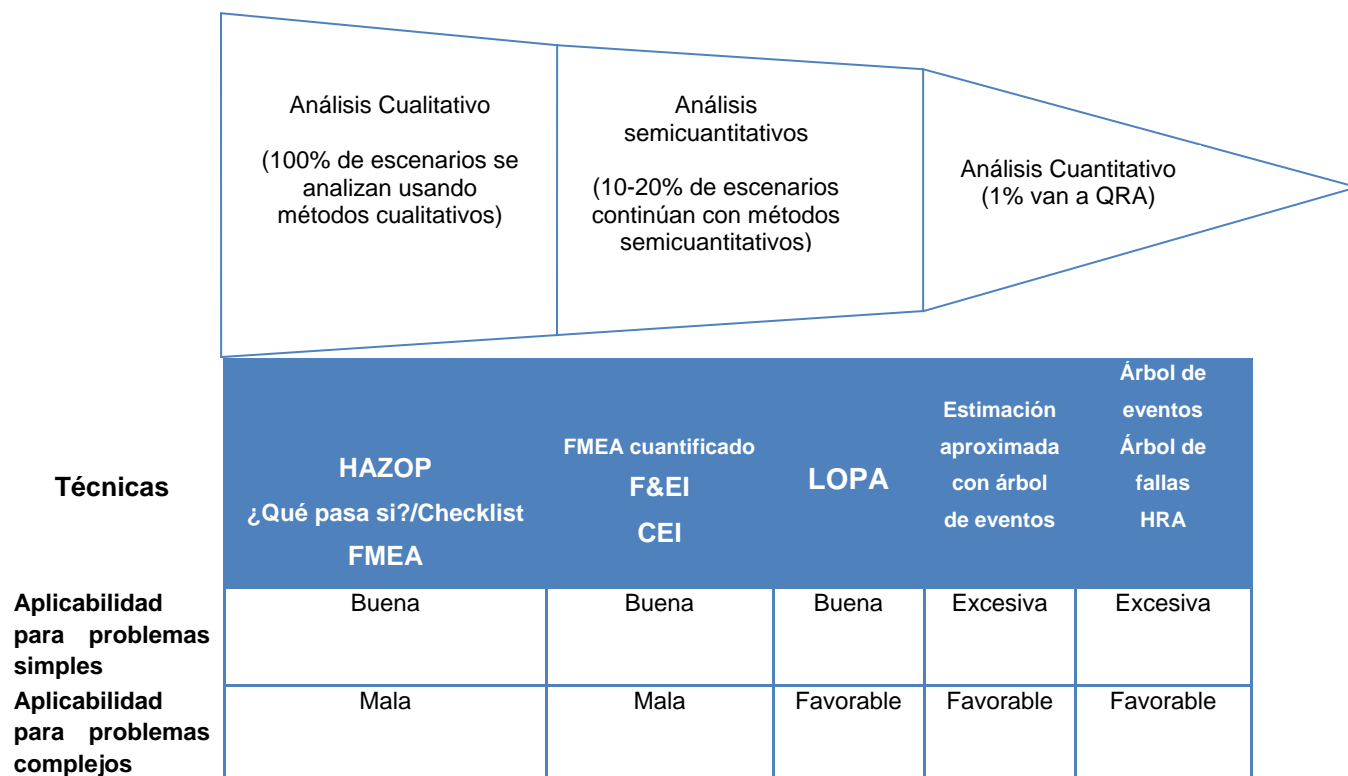


Figura 8. Espectro de herramientas para la toma de decisiones basada en el riesgo.

2. MARCO NORMATIVO NACIONAL

2.1. Referente a la Seguridad e Higiene en las Instalaciones

Existen en México ciertos códigos, normas, reglamentos, leyes y guías que establecen la aplicación obligatoria o voluntaria de tópicos que deben considerarse para llevar a cabo un Análisis de Riesgos de Proceso, para ciertas instalaciones o dependiendo del objetivo de la evaluación.

El artículo 123, Apartado “A”, fracción XV, de la Ley Suprema dispone que el patrono estará obligado a observar, de acuerdo con la naturaleza de su negociación, los preceptos legales sobre higiene y seguridad en las instalaciones de su establecimiento, y a adoptar las medidas adecuadas para prevenir accidentes en el uso de las máquinas, instrumentos y materiales de trabajo, así como a organizar de tal manera este, que resulte la mayor garantía para la salud y la vida de los trabajadores [11].

La Ley Federal del Trabajo, en su artículo 132, fracción XVI, consigna la obligación del patrón de instalar y operar las fábricas, talleres, oficinas, locales y demás

lugares en que deban ejecutarse las labores, de acuerdo con las disposiciones establecidas en el reglamento y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo, a efecto de prevenir accidentes y enfermedades laborales, así como de adoptar las medidas preventivas y correctivas que determine la autoridad laboral [12].

Asimismo, el referido ordenamiento determina, en su fracción XVII, la obligación que tienen los patrones de cumplir el reglamento y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo, así como de disponer en todo tiempo de los medicamentos y materiales de curación indispensables para prestar oportuna y eficazmente los primeros auxilios [12].

El referido ordenamiento también recoge las siguientes obligaciones a cargo de los trabajadores, en su artículo 134, fracciones II y X: observar las disposiciones contenidas en el reglamento y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo y las que indiquen los patrones para su seguridad y protección personal, y someterse a los reconocimientos médicos previstos en el reglamento interior y demás normas vigentes en la empresa o establecimiento, para comprobar que no padecen alguna incapacidad o enfermedad de trabajo, contagiosa o incurable [12].

Por otra parte, la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal faculta a la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, en su artículo 40, fracción XI, para estudiar y ordenar las medidas de seguridad e higiene industriales para la protección de los trabajadores [13].

La Ley Federal del Trabajo dispone en su artículo 512 que en los reglamentos e instructivos que las autoridades laborales expidan se fijarán las medidas necesarias para prevenir los riesgos de trabajo y lograr que el trabajo se preste en condiciones que aseguren la vida y la salud de los trabajadores [12].

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización determina, en sus artículos 38, fracción II, 40, fracción VII, y 43 al 47, la competencia de las dependencias para expedir las normas oficiales mexicanas relacionadas con sus atribuciones; la finalidad que tienen éstas de establecer, entre otras materias, las condiciones de

salud, seguridad e higiene que deberán observarse en los centros de trabajo, así como el proceso de elaboración, modificación y publicación de las mismas [14].

El Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo establece en su artículo 4 la facultad de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social para expedir las normas oficiales mexicanas de seguridad e higiene en el trabajo, con base en la Ley, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y el presente Reglamento [15].

Las normas oficiales mexicanas que emite la Secretaría del Trabajo y Previsión Social determinan las condiciones mínimas necesarias para la prevención de riesgos de trabajo y se caracterizan por que se destinan a la atención de factores de riesgo, a los que pueden estar expuestos los trabajadores.

En el presente, se encuentran vigentes 41 normas oficiales mexicanas en materia de seguridad y salud en el trabajo. Dichas normas se agrupan en cinco categorías: de seguridad, salud, organización, específicas y de producto. Su aplicación es obligatoria en todo el territorio nacional.

Las primeras tres categorías se aplican de manera obligatoria en los centros de trabajo que desarrollan actividades de producción, comercialización, transporte y almacenamiento o prestación de servicios, en función de las características de las actividades que desarrollan y de las materias primas, productos y subproductos que se manejan, transportan, procesan o almacenan.

Para la cuarta categoría se prevé su aplicación obligatoria en las empresas que pertenecen a los sectores o actividades específicas a que se refieren tales normas.

Finalmente, la quinta categoría corresponde a las empresas que fabrican, comercializan o distribuyen equipos contra incendio y de protección personal.

La Secretaría del Trabajo y Previsión Social, como dependencia del Poder Ejecutivo Federal, tiene a su cargo el desempeño de las facultades que le atribuyen la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, la Ley Federal del Trabajo, otras leyes y tratados, así como los reglamentos, decretos, acuerdos y

órdenes del Presidente de la República en materia de seguridad e higiene en las diversas empresas.

2.2. Referente al Medio Ambiente

En el ámbito ecológico, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en su artículo 28 menciona que, cuando se quiera realizar alguna obra o actividad industrial en el país que pueda causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el medio ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, se debe desarrollar y presentar a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) [16], en el caso de que se trate de Actividades Altamente Riesgosas (AAR) se incluye un estudio de riesgo llamado ERA, requisito para presentar el Programa para la Prevención de Accidentes (PPA).

Para realizar el estudio de riesgo, en el caso de proyectos nuevos que no se encuentren en operación, la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA) puso a disposición la “Guía para la presentación del estudio de riesgo modalidad análisis de riesgo” y la “Guía para la presentación del estudio de riesgo modalidad ductos terrestres”, mientras que para el estudio de riesgos en instalaciones en operación la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR), puso a disposición la “Guía para la elaboración del estudio de riesgo (instalaciones en operación)”.

El Ordenamiento ecológico “Instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos” (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Título Primero, Art.3 fracción XXIII). Con lo que se establece un marco básico de gestión integral del territorio y sus recursos, siendo además una herramienta estratégica para la convergencia entre estado y sociedad.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece que el Ordenamiento ecológico es un instrumento de la política ambiental obligatorio para los programas de desarrollo nacional (Artículo 17). Señala además, cuáles son los criterios que deben considerarse para la formulación del mismo (Artículo 19), cuáles son sus modalidades (Artículo 19 Bis).

Existe también un esquema regulatorio Federal en materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica denominado Sistema Integrado de Regulación Directa y Gestión Ambiental para la Industria (SIRG), que tiene como objetivo principal incorporar la gestión ambiental como parte del proceso total de administración de las empresas.

El SIRG contiene tres elementos básicos, dos son obligatorios y el otro es de carácter voluntario:

1. La Licencia Ambiental Única (LAU)
2. La Cédula de Operación Anual (COA)
3. Programa Voluntario de Gestión Ambiental (PVGA)

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación [17].

Se han desarrollado normas de tipo no obligatorio conocidas como NMX y otras emitidas por la SEMARNAT ordenadas por materia. El órgano administrativo más importante quien lleva el cumplimiento de la normatividad ambiental a fin de contribuir al desarrollo sustentable es la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), entre sus atribuciones se encuentran vigilar el cumplimiento de las disposiciones legales; salvaguardar los intereses de la población en materia ambiental procurando el cumplimiento de la legislación

ambiental, sancionar a las personas físicas y morales que violen dichos preceptos legales.

2.3. Tratados

Debido al Tratado de Libre Comercio la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), adoptó un programa llamado Sistema de Administración en Responsabilidad Integral (SARI), éste tiene como objetivo apoyar a las empresas la mejora continua del proceso en las áreas de Medio Ambiente, Seguridad e Higiene.

México ha ratificado dos convenios importantes, el primero es sobre seguridad y salud de los trabajadores y medio ambiente de trabajo (Convenio 155) y el segundo es relativo a la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo (Convenio 170), ambos han sido ante la Organización Internacional del Trabajo (OIT).

3. EMPLEO DEL LOPA EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS DE PROCESO

3.1. ¿Qué es el LOPA?

El Análisis de Capas de Protección es una herramienta semicuantitativa para analizar y evaluar el riesgo [9]. Este análisis se basa normalmente en la información desarrollada durante una evaluación cualitativa del riesgo. La finalidad de este método racional y objetiva, es determinar el número de capas de protección que se requieren en el proceso y cuanta disminución en el riesgo debe proveer cada capa para cada escenario, esta metodología reduce la toma de decisiones subjetivas, facilitando la comprensión de los riesgos entre el personal.

Esta técnica analiza la efectividad de las capas de protección de forma individual y los efectos combinados de varias capas, para ser comparadas posteriormente con los criterios de tolerancia al riesgo desarrollados por cada industria. Un escenario puede requerir una o muchas capas de protección dependiendo de la complejidad del proceso y gravedad de la consecuencia.



Figura 9. Capas de defensa contra un posible accidente

El LOPA no sugiere que capas se deben añadir o que diseño elegir, pero ayuda a juzgar entre varias alternativas de mitigación del riesgo, dicha técnica se limita a evaluar sólo un par único causa-consecuencia como un escenario [9].

A diferencia de otras metodologías de evaluación de riesgos, el LOPA puede ser utilizado efectivamente en cualquier momento del ciclo de vida del proceso.

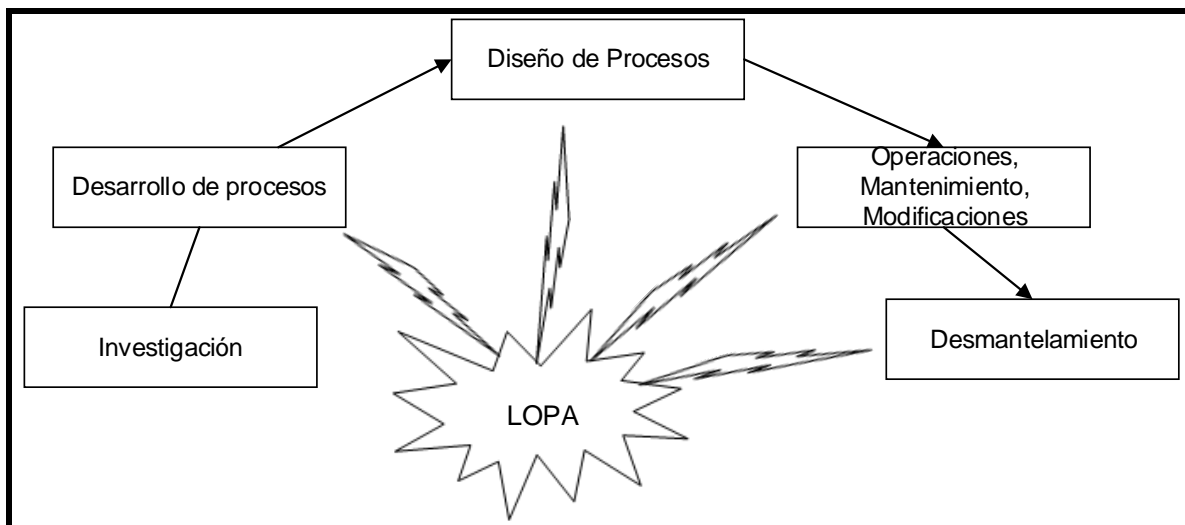


Figura 10. El ciclo de vida del proceso mostrando dónde se usa normalmente el LOPA [9]

También es importante mencionar que el LOPA es un método para clasificar Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF's) determinando su Nivel apropiado de Integridad de la Seguridad (SIL), y además, es una herramienta de análisis

para reducir el número de escenarios que pudieran ser valorados por algún método cuantitativo.

Otra ventaja de recurrir al LOPA es que define los requerimientos para considerar una salvaguarda como una Capa Independiente de Protección (IPL), determina fácilmente si el riesgo es tolerable para un proceso, establece acciones y respuestas del operador que son críticas para la seguridad del proceso, identifica equipos críticos que, como parte de una IPL son confiables para mantener el proceso dentro de los criterios de tolerancia de las compañías, sometiéndolos a pruebas, inspecciones y mantenimientos específicos.

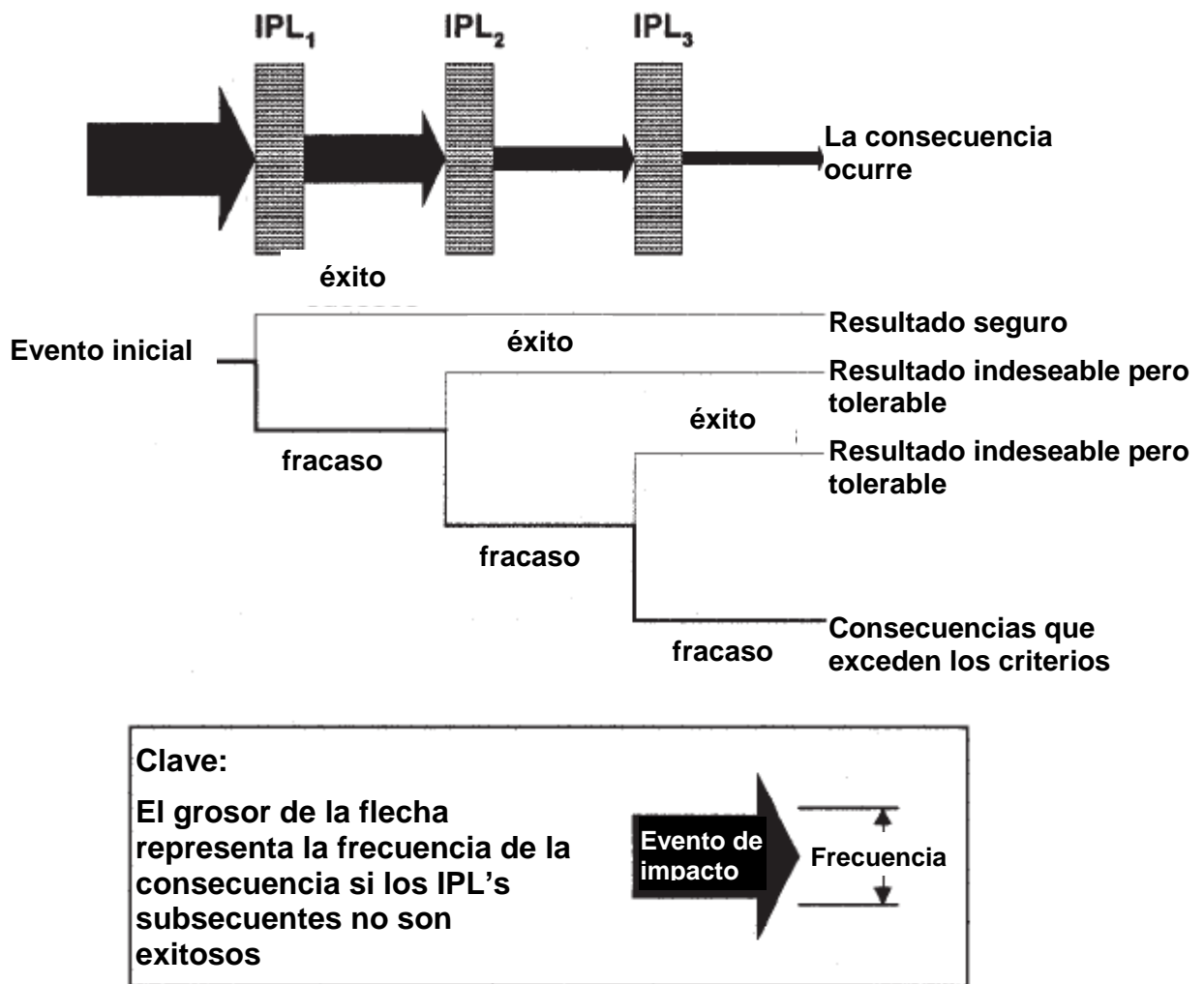


Figura 11. Comparación del LOPA y el análisis de árbol de eventos [9]

La información clave para alcanzar el máximo beneficio de esta técnica es:

- Contar con criterios de tolerancia al riesgo

- Tener un enfoque estructurado para manejar y/o mitigar el riesgo, es decir, que la organización cuente con políticas y prácticas respecto a la gestión de riesgos
- Determinar si la organización tiene experiencia utilizando métodos cualitativos y cuantitativos
- Poseer escenarios obtenidos por medio de métodos de identificación de riesgos usualmente cualitativos (HAZOP, ¿Qué pasa sí?, etc)
- Desarrollo de categorías de consecuencias
- Datos de Falla de Equipos
- Índices de error humano
- Datos de incidentes
- Criterios de Frecuencias
- Protocolos para que el LOPA se aplique consistentemente

Como todos los métodos analíticos, esta herramienta no es la excepción, tiene pasos a seguir para llevar a cabo un análisis de riesgos, que constan de seis etapas:

- Identificar la consecuencia para explorar el escenario
- Seleccionar un escenario de accidente
- Identificar el evento inicial de un escenario y determinar la frecuencia del evento inicial (eventos por año)
- Identificar las IPL's y valorar la probabilidad de falla en la demanda de cada IPL
- Valorar el riesgo del escenario combinando matemáticamente los datos de la consecuencia, del evento inicial y de la IPL
- Evaluar el riesgo para lograr una decisión concerniente al escenario

Esta herramienta no debe usarse como reemplazo de análisis cuantitativos, la decisión de proceder a un QRA se basa normalmente en el nivel de riesgo determinado por el LOPA.

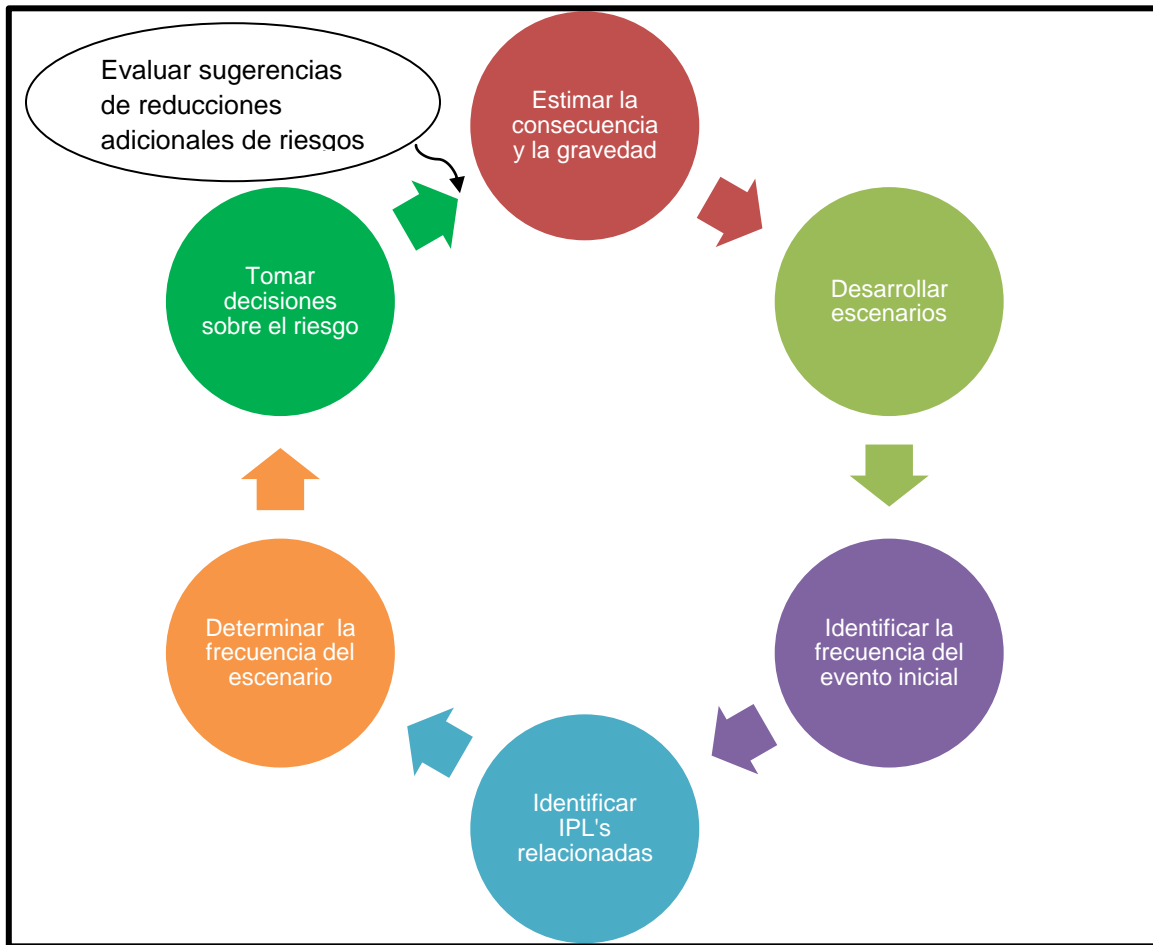


Figura 13. Cómo funciona el LOPA

El LOPA puede aplicarse en equipo o por un analista único, aunque en la práctica emplean subequipos compuestos de varios analistas e ingenieros de procesos, dependiendo del alcance de la evaluación.

3.2. Limitaciones del LOPA

La metodología proporciona aproximaciones de riesgos que son útiles para hacer comparaciones, ayudando a colocar recursos limitados para el control de riesgos, aunque para muchos propósitos los resultados del análisis tienen suficiente precisión para cuantificar adecuadamente el riesgo de un escenario específico del proceso.

Las comparaciones de los escenarios de riesgo son únicamente válidas si se basan en el mismo método, además subestima la probabilidad de error humano para una tarea compleja.

No es una herramienta para identificar riesgos, ya que el LOPA depende de estos métodos, aunque puede clarificar escenarios definidos incorrectamente.

Las diferencias en los criterios de tolerancia al riesgo y el objetivo de la evaluación entre las organizaciones, no permite comparar los resultados directamente de una organización a otra.

3.3. Beneficios

Para escenarios y decisiones complejas que no se pudieron valorar debido a un análisis cualitativo, esta herramienta requiere menos tiempo en comparación de los análisis cuantitativos de riesgos, porque tiene un enfoque a la toma de decisiones.

Ayuda a alcanzar juicios sobre el riesgo más rápidamente y justificados, facilitando la determinación de pares causa-consecuencia más precisos y por ende la mejora en la identificación de escenarios.

Identifica operaciones y prácticas que previamente se pensaban que tenían suficientes salvaguardas, proporcionando información para decidir en qué salvaguardas enfocarse durante la operación, mantenimiento y capacitación, conllevando esto a una especificación clara y funcional para una IPL, a su vez ayuda a decidir si el riesgo es ALARP para cumplir con requerimientos regulatorios específicos y para implementar una integridad mecánica inteligente.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS CON LOPA

4.1. Estimación de las consecuencias y la gravedad

Debido a que esta metodología normalmente evalúa escenarios que se han desarrollado en un estudio previo, el primer paso es explorar estos escenarios, el método de exploración más común se basa en las consecuencias, éstas previamente se identifican durante una revisión cualitativa de riesgo, como por ejemplo un estudio HAZOP. Posteriormente se evalúa la consecuencia y el impacto que conlleva, valorando su magnitud.

Lo más importante en esta etapa es limitar hasta donde va a comprender el impacto, dado que, la magnitud de las repercusiones de una descarga (de material

o energía) varía. Por ejemplo un analista puede incluir solo la descarga, lo cual implica, más no manifiesta explícitamente, el impacto al ambiente, a los operadores y el sistema de producción, en cambio otra persona puede modelar la descarga y valorará explícitamente el riesgo para la gente, el ambiente y la producción explicando la posibilidad del daño resultante de un escenario específico.

El escenario de interés más común para LOPA en la industria de procesos es la pérdida de la contención de material o energía peligroso que pueden ocurrir por diversas causas. El rango de consecuencias para un escenario de pérdida de contención incluye la descarga de materiales peligrosos, la dispersión del material peligroso, efectos físicos provenientes de incendios, explosiones y descargas tóxicas; y las pérdidas derivadas del impacto de los efectos físicos [9].

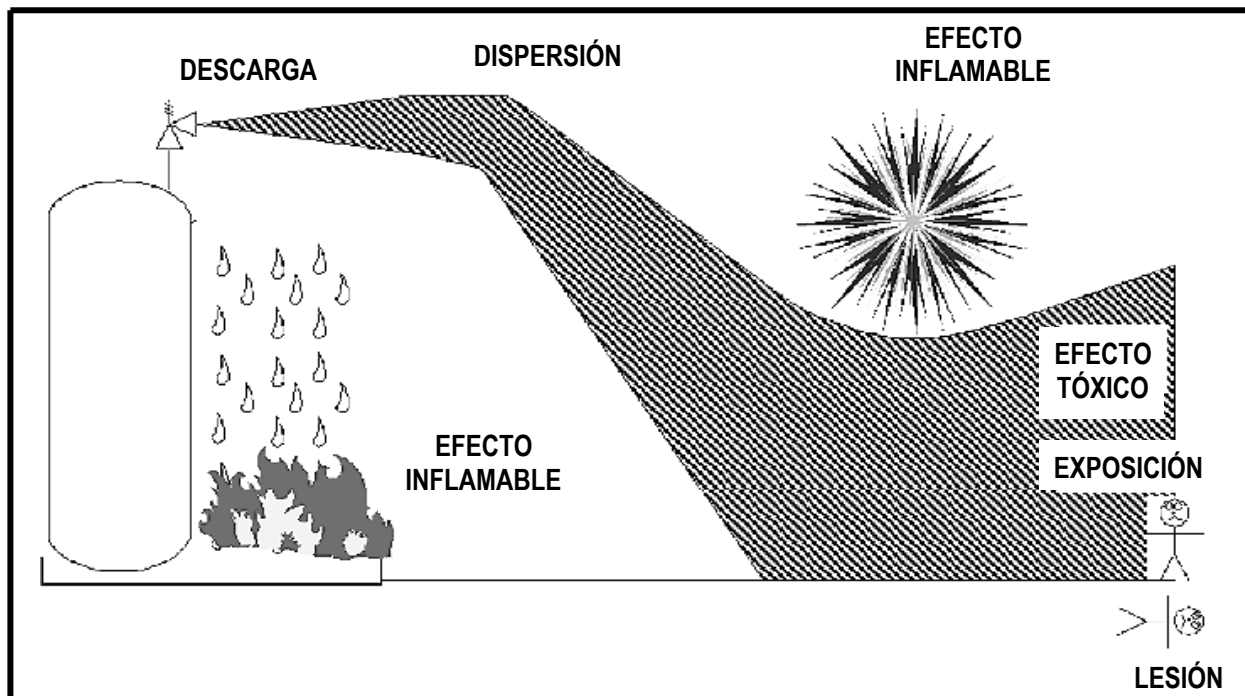


Figura 14. Consecuencias potenciales a partir de la descarga de material inflamable/tóxico [9]

Por lo anterior, dichas consecuencias se deben cuantificar por medio de algún método de evaluación, los métodos de evaluación de las consecuencias para LOPA son:

- Tamaño de la descarga / caracterización
- Estimaciones simplificadas de las lesiones / muertes

- Estimaciones simplificadas de las lesiones / muertes con ajustes
- Estimaciones detalladas de lesiones / muertes

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, el método utilizado para la categorización de las consecuencias debe ser consistente con los criterios de tolerancia al riesgo de la compañía. Se debe considerar cuidadosamente el nivel de detalle para el análisis de consecuencias, ya que esta elección puede afectar significativamente el nivel de esfuerzo y capacitación requerida.

4.1.1. Método 1: Método de la Categoría sin Referencia Directa al Daño Humano

Este método normalmente utiliza matrices para diferenciar las consecuencias en varias categorías, evitando la necesidad de cálculos cuantitativos. Evita estimar el número de lesiones o muertes potenciales, ayudando a hacer juicios más precisos solamente en la descarga del material.

En las matrices se le asigna a las consecuencias una categoría numérica que va desde 1 hasta 5, siendo 5 la más grave. Las matrices principalmente relacionan el tamaño de la descarga, las propiedades físicas o toxicológicas, tipo de planta, tipo de daño o pérdida en la producción, factores equivalentes de costo con las consecuencias.

Lo más destacado a considerar es que el analista juzgue que matrices describen mejor las consecuencias, ya que esta herramienta, permite una evaluación visual ubicando el riesgo dado.

Una vez que se asigna la categoría, la consecuencia más grave en cuestión se combina con la frecuencia calculada o anticipada para evaluar si el riesgo es tolerable o no. Ya que las consecuencias no se presentan en términos numéricos, puede ocasionar problemas en alguna organización.

4.1.2. Método 2: Estimaciones Cualitativas con Daño Humano

Este método utiliza como consecuencia de interés el impacto a humanos, pero llega al valor utilizando el juicio cualitativo únicamente.

Para cada escenario, las consecuencias humanas se estiman directamente por el analista del LOPA, utilizando experiencia previa, tablas de búsqueda previamente generadas, o conocimiento previo de modelos detallados de descarga [9].

Aunque muchas empresas tienden a entender mejor las consecuencias en términos de daño en lugar de expresar el riesgo en términos tamaño de descarga y contar con reglas para el riesgo de una fatalidad y/o lesión, las suposiciones implícitas de las probabilidades de que una persona esté presente en el área pueden sobre o subestimar el peligro que se está analizando.

4.1.3. Método 3: Estimaciones Cualitativas con Daño Humano con Ajustes para Probabilidades post-descarga

Alternativamente, el analista del LOPA puede estimar inicialmente la magnitud de una descarga “cualitativamente” de manera similar al Método 2 (pero no tan subjetiva) y luego ajustar la frecuencia del evento (dependiendo del caso de estudio y el juicio del analista) para la probabilidad de que:

- El evento resultará en una nube tóxica o inflamable;
- Para una nube inflamable, una fuente de ignición estaría presente;
- Un individuo estará presente en el área cuando el evento ocurra;
- El individuo experimentará una consecuencia fatal (o que provoque lesiones)

La mayor parte de las personas, tienden a entender mejor las consecuencias en términos de daño en lugar de expresar el riesgo en términos de tamaño de descarga, esto produce una mejor comparación directa con reglas corporativas establecidas entendiendo de una manera simple la consecuencia, habría que decir, que los resultados de las probabilidades de eventos del mundo real son

menores en comparación con los calculados por analistas y que debe ser complementado para considerar el impacto en el negocio.

4.1.4. Método 4: Estimaciones Cuantitativas con Daño Humano

Este procedimiento es similar al Método 3, la diferencia radica en que involucra el uso de modelos matemáticos computarizados complejos para determinar los efectos de una descarga y sus efectos sobre individuos y equipos.

El modelo se basa principalmente en el comportamiento de los vapores, su dispersión, el efecto tóxico o de estallido/térmico, aportando una estimación de la superficie afectada y las concentraciones de vapor esperadas, es necesario recalcar que el Método 4 se emplea normalmente cuando se hace un análisis tipo cuantitativo (un paso más adelante del LOPA).

Aunque generan mayor grado de certeza los programas de modelación a las consecuencias pronosticadas que los métodos de estimación, los resultados de los eventos del mundo real es muy desproporcionada, es decir, los eventos pueden resultar en una sobre estimación o subestimación, a causa de que la simulación está fuertemente afectada por las condiciones exactas de la descarga (dirección del viento, tiempo de ignición, velocidad de liberación estimada, condiciones atmosféricas, presión, etc.)

4.2. Desarrollo de Escenarios

Es el paso en el cual el analista o el equipo construye una serie de eventos, incluyendo eventos iniciales y la falla de las IPL's (capas independientes de protección), que llevan a una consecuencia indeseable.

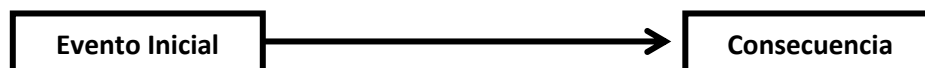


Figura 14. Requerimientos mínimos para un escenario

Es esta parte también se intenta reducir el riesgo por medio de eliminación de escenarios, usualmente previniendo o reduciendo la consecuencia de un evento inicial, por ejemplo un flujo de una válvula de alivio en lugar de ser

enviado a la atmósfera directamente pasa por un quemador, el riesgo asociado con escenarios con estas consecuencias puede reducirse o eliminarse.

Cada escenario debe tener un par único evento inicial-consecuencia. Si el mismo evento inicial puede resultar en consecuencias diferentes, se deben desarrollar escenarios independientes adicionales [9].

Si se emplea alguna de las tres primeras metodologías que utiliza el LOPA ya mencionadas para evaluar la consecuencia, se pueden complementar al momento de calcular la frecuencia del escenario (paso 5), incluyendo algunos o todos los factores siguientes (según sea el caso):

- la probabilidad de ignición de un material inflamable (derrame de líquido o vapor),
- la probabilidad de una persona estando presente en el área afectada por el evento,
- la probabilidad de que una lesión fatal resultará a partir de la exposición a los efectos del incendio, explosión o emisiones tóxicas – incluye acción de protección o evacuación, o
- la probabilidad de que resulte alguna pérdida financiera estimada para las instalaciones de cierta magnitud

4.2.1. Identificar Candidatos de Escenarios

Las fuentes de información más común para identificar escenarios son:

- Retomar la información de un análisis cualitativo previo, ya que es el punto clave para el desarrollo del LOPA
- Problemas relacionados con la operación de la planta, esto puede involucrar comportamientos inesperados, o condiciones de operación fuera de los rangos normales, etc.;
- Incidentes en el proceso, o de otros procesos, los cuales revelan un evento inicial o escenario no considerado previamente o el cual no se consideró creíble;
- Los requerimientos para cambiar el proceso, los cuales podrían involucrar escenarios nuevos o modificados;

- Revisiones en las SIF's para evaluar si se requiere o no la función instrumentada de seguridad y, en caso afirmativo, el tipo de SIF requerido para cumplir con las reglas generales de riesgos corporativas.

Un análisis cualitativo previo, puede haber identificado el evento inicial para un escenario dado, pero los eventos habilitadores y salvaguardas a menudo se obvian, no se incluyen apropiadamente, no se entienden o documentan completamente, mas sin en cambio, siguiendo la metodología del LOPA se pueden identificar los eventos y salvaguardas que pudieran ser IPL's que pasaron desapercibidos complementando la información precedente, lo que con lleva a un mejor análisis LOPA.

4.2.2. Desarrollo del escenario

Una vez que se ha identificado un escenario, éste debe ser desarrollado y documentado de tal manera que se alcance un nivel de entendimiento básico de los eventos y salvaguardas, además, durante esta etapa también se pueden detectar nuevos escenarios que deben analizarse individualmente.

En el desarrollo del escenario se deben incluir todos los pasos importantes requeridos para que progrese el evento inicial hasta la consecuencia, es decir, determinar si se requieren algunas condiciones habilitadoras, factores que pudieran afectar el cálculo numérico de la frecuencia y la magnitud o tipo de la consecuencia, recomendaciones, suposiciones, referencias, por mencionar algunos.

Es sumamente importante mantener la relación entre un evento inicial específico, una consecuencia específica, e IPL's específicos. De otra manera, los IPL's podrían no ser acreditados apropiadamente.

El paso siguiente es confirmar la consecuencia declarada del paso 1 de la metodología LOPA, por ejemplo, si se emplearon los Métodos 1 y 2 (categorizan el tamaño/tipo de descarga y daño respectivamente) para determinar la consecuencia, entonces se debe calcular o evaluarse para cada escenario.

De igual modo, si se emplea el Método 3 o 4 (que emplean frecuencias de fatalidad), se debe asignar probabilidades apropiadas para los cálculos del escenario.

Otro paso para desarrollar el escenario es enlistar todas las salvaguardas que están dispuestas para un escenario específico antes de decidir cuáles son realmente IPL's, esta práctica documenta los problemas considerados y permite que subsecuentes revisores entiendan porque se consideraron o no algunas salvaguardas como IPL's.

El desarrollo de escenarios a menudo clarifica o modifica el o los camino(s) inicial(es) por medio de los cuales un evento inicial dado puede resultar en una consecuencia indeseable, conforme progresa el análisis se va generando información importante como:

- La consecuencia es menos o más seria de lo que inicialmente se pensó
- Hay más IPL's de las que originalmente se incluyeron en el análisis
- La frecuencia del evento inicial es más baja o alta de lo esperado, debido a que las salvaguardas no fueron realmente independientes o efectivas

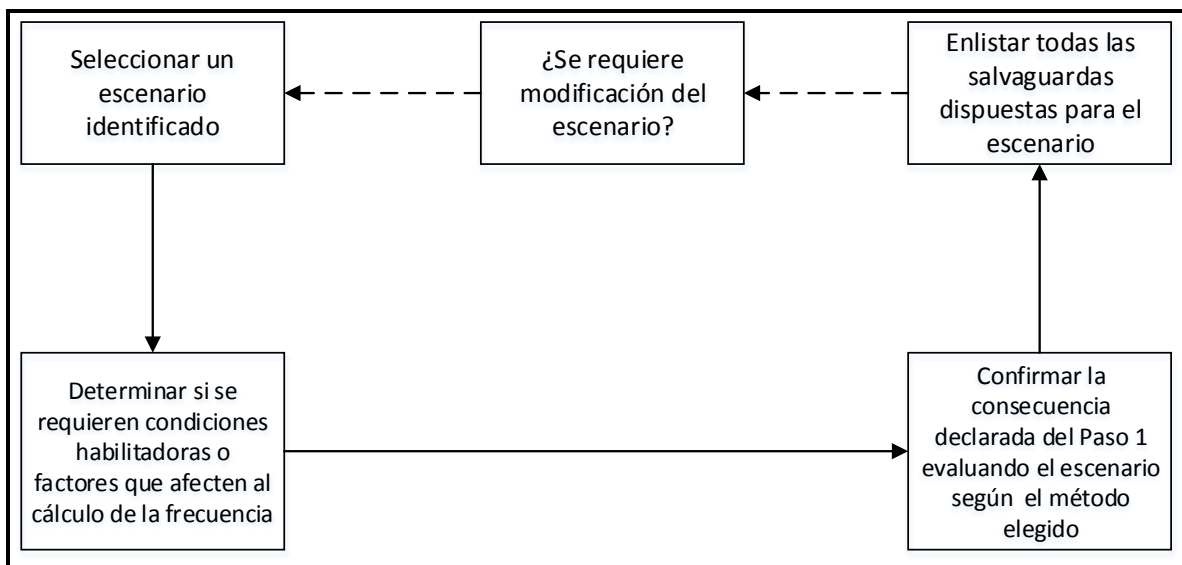


Figura 15. Diagrama de flujo para el desarrollo de escenarios por LOPA

Tabla 7. Ejemplo de Hoja Resumen para la Documentación del Escenario LOPA y sus cálculos

Número de escenario	Número de Equipo	Título del Escenario	
Fecha:	Descripción	Probabilidad	Frecuencia (por año)
Descripción/Categoría de la consecuencia			
Criterios de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)			
Evento Inicial (Normalmente una Frecuencia)			
Condición o Evento Habilitador			
Modificadores de la Condición (Si aplica)			
	Probabilidad de ignición		
	Probabilidad de personal afectado en el área		
	Probabilidad de lesión fatal		
	Otros		
Frecuencia de Consecuencia no Mitigada			
Capas de Protección Independientes			
	BPCS		
	Intervención humana		
	SIF		
	Dispositivo de alivio de presión		
	Otras capas de protección (debe justificarse)		
	Salvaguardas (no IPLs)		
PFD total para todos los IPLs			
Frecuencia de Consecuencias Mitigadas			
¿Se Cumplieron los Criterios de Tolerancia al Riesgo? (Sí/No):			
Acciones Requeridas para Cumplir con los Criterios de Tolerancia al Riesgo:			
Notas:			
Referencias (ligas para revisión de riesgos originales, PFD, P&ID, etc.):			
Analista del LOPA (y miembros del equipo, si aplica):			

4.3. Identificación de la Frecuencia del Evento Inicial

Para determinar la frecuencia del evento inicial primero se deben identificar y posteriormente estimar su frecuencia.

4.3.1. Tipos de eventos iniciales

Los eventos iniciales se agrupan en tres tipos generales: eventos externos, fallas en el equipo, y fallas humanas, cabe resaltar que, dichos eventos pueden ser el resultado de varias causas raíz tal como se muestra en la Figura 16, ya que contribuyen a determinar la frecuencia del evento inicial, por otro lado, en esta etapa se debe tener cuidado en evitar profundizar las causas raíz.



Figura 16. Tipos de eventos iniciales [9]

En la figura anterior sólo se ilustran algunas de varias causas raíz.

Antes de asignar las frecuencias a los eventos iniciales, se deben revisar todas las causas del paso 2 y verificar que los eventos iniciales correspondan a las consecuencias identificadas, es decir, haber generado una relación única causa-consecuencia, sin excluir ninguna causa del proceso.

Algunos errores que cometen los analistas al tomar como eventos iniciales en esta etapa son:

- Capacitación/certificación inadecuada del operador: Esta es una posible causa implícita de un evento inicial (se asumen niveles específicos de capacitación y certificación del sitio o la compañía le asigna índices de falla).
- Pruebas e inspecciones inadecuadas: Esta es una posible causa subyacente de un evento inicial (se asumen niveles normales de frecuencia de pruebas e inspecciones para un sitio o la compañía le asigna índices de falla).
- No disponibilidad de dispositivos de protección como válvulas de seguridad o interruptores de alta velocidad (otros eventos deben primero iniciar el escenario, antes de que se desafíe un dispositivo de protección).

Un punto importante en esta etapa es reducir cada causa en eventos discretos de falla y enlistarlas por separado, por ejemplo, la pérdida de enfriamiento de un reactor tipo batch, puede ser el resultado de la falla de una bomba, una falla eléctrica, o una falla en lazo de control, esto es de mucha utilidad debido a que las capas existentes o nuevas de protección pueden ser diferentes para cada evento inicial.

Adicionalmente, el analista debe asegurarse que los eventos iniciales en todos los modos de operación se han identificado/examinado (por ej. operación normal, inicio, apagado, corte en suministro de servicios, cierres de operación de emergencia) y los estados del equipo (por ej. standby, en mantenimiento)

En algunos escenarios el evento inicial puede no ser obvio, en tales escenarios se encuentran eventos o condiciones habilitadoras.

4.3.2. *Estimación de la Frecuencia*

La frecuencia de ocurrencia es el factor clave que conduce el escenario, normalmente se expresa en eventos por año, ya sea, en sistema decimal, notación científica, base exponencial o números enteros, pero siempre debe ser consistente en todas las etapas del LOPA, dicho lo anterior, no es válido que para un escenario se exprese en números enteros y para otro se utilice notación científica durante un análisis de riesgos.

Las fuentes para asignar valores consistentes a la frecuencia del evento inicial, se les denominan datos de índice de falla, algunas de estas son:

- “Guidelines for Process Equipment Reliability Data” (CCPS, 2010)
- OREDA (1997)
- IEEE
- Reliability Data Collection and Use in Risk and Availability Assessment (EuReData 1986)
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration)
- Experiencia de la compañía (datos históricos, datos de incidentes experiencia del operador, índices de error humanos etc.)
- Datos del vendedor
- Aplicación de un análisis de frecuencia (árbol de eventos, árbol de fallas)

En el anexo B se muestran algunos valores típicos de Frecuencia asignados para eventos iniciales.

Típicamente se emplea el uso de arboles cuando una causa pueda tener fallas múltiples en los componentes, por ejemplo, en un lazo de control es una combinación de sensores, solucionadores lógicos, controladores de proceso, y los elementos finales de control y cada componente tiene un índice de falla, aunque existen fuentes donde se proporciona la frecuencia contemplando todos los componentes.

4.3.3. Selección de Índices de Falla en el LOPA

Los índices de falla deben seleccionarse con varias consideraciones en mente:

- Deben ser consistentes con el diseño básico de las instalaciones y con los protocolos de la compañía para decisiones basadas en riesgos
- Todos los índices de falla utilizados deben ser de la misma ubicación en el rango de datos (por ejemplo, hay fuentes donde se proporciona a la frecuencia en tres categorías: baja, significativa o alta, en estos casos solo se debe tomar un mismo rango de valor para toda la evaluación) y deben redondearse al orden de magnitud entero más próximo
- Los datos de índice de falla seleccionados deben ser representativos para la industria u operación bajo consideración
- Involucrar supuestos implícitos al seleccionar datos, es decir, parámetros de operación, químicos específicos procesados, pruebas básicas y frecuencia de inspección, programas de mantenimiento y de capacitación al operador, calidad de diseño del equipo, por mencionar algunos, siempre asegurando que los datos de índice de falla utilizados para un proceso sean consistentes con los supuestos básicos a los datos

4.3.4. Ajuste de Índices de Frecuencia

En ocasiones los datos de falla se expresan como probabilidad de falla en la demanda (PFD). Por ejemplo, el error humano en ejecutar una tarea puede expresarse como 1×10^{-1} /oportunidad, o la caída de una carga de grúa puede expresarse como 1×10^{-4} /levantamiento. Cuando este sea el caso, la frecuencia del evento inicial debe derivarse, es decir, se debe contar el número de veces que la operación se lleva a cabo por año y multiplicarlo por la probabilidad de falla en la demanda.

Para operaciones/sistemas que no son operados continuamente (carga/descarga, procesos en lote, etc.) los datos de índice de falla deben ajustarse para reflejar el “tiempo en riesgo” para el componente u operación bajo consideración. Dado que la mayoría de los datos de índice de falla se expresan con unidades “por año” (yr^{-1}), es necesario ajustar los datos para que

reflejen que el componente u operación no está sujeta a falla durante el año entero, solo se debe expresar aquella fracción del año cuando está operando o “en riesgo”. Esto se hace multiplicando el índice de falla por la fracción del año que el componente está en operación, el siguiente ejemplo sirve para ilustrar la frecuencia de un lazo de control que mide el flujo en una operación de lote, el lazo de control tiene un índice básico de falla de servicio de 1×10^{-2} /año, la operación de la carga toma una hora y se lleva a cabo ocho veces por año.

$$F = \left(\frac{\frac{1 \times 10^{-2}}{\text{año}} * \frac{8}{\text{año}} * 1h}{\frac{8760 h}{\text{año}}} \right) = \frac{1 \times 10^{-5}}{\text{año}} \quad (\text{Ecu. 1})$$

4.4. Identificación de las Capas de Protección Independientes

Una IPL es un dispositivo, sistema, o acción que es capaz de evitar que un escenario procese a su consecuencia indeseable independientemente del evento inicial o la acción de cualquier otra capa de protección asociada al escenario, si una capa opera conforme a lo esperado, la consecuencia indeseable se evita. Si todas las IPL's en un escenario fallan en realizar su función, entonces la consecuencia indeseable ocurrirá.

La distinción entre una IPL y una salvaguarda es importante. Una salvaguarda es cualquier dispositivo, sistema o acción que probablemente interrumpiría la cadena de eventos después de un evento inicial. Sin embargo, la efectividad de algunas salvaguardas no cubren los requisitos dada la falta de datos, incertidumbre en lo que respecta a independencia, o efectividad, u otros factores [9].

La efectividad de una IPL se califica en términos de su probabilidad de falla en la demanda (PFD), la cual se define como la probabilidad de que un sistema (en este caso la IPL) fallará en realizar una función específica, es un número adimensional entre 0 y 1. Mientras más bajo sea el valor de la PFD, más grande será la reducción en la frecuencia de la consecuencia de un evento inicial dado.

A la “reducción en la frecuencia de la consecuencia” alcanzada por una IPL en ocasiones se le conoce como “factor de reducción de riesgo”.

Las salvaguardas pueden clasificarse como

- Activa (involucra la intervención del personal o depende de alguna fuente de energía) o pasiva (no requiere acción del personal ni depende para su operación de alguna fuente de energía)
- Preventiva (previo a una descarga) o mitigadora (post-descarga)

En la Figura 9 se muestran las salvaguardas que pueden emplearse para evitar o minimizar los efectos de los incidentes.

4.4.1. Características de las diversas salvaguardas

Diseño del Proceso

Existen dos consideraciones que las compañías optan para llevar a cabo el diseño de un proceso inherentemente más seguro. El primero supone que algunos escenarios no pueden ocurrir debido al diseño seguro del equipo utilizado en el proceso, si se emplea este método el diseño del proceso no se considera una IPL ya que no existen escenarios o consecuencias a considerarse sin embargo, se requiere inspección y mantenimiento, por ejemplo, un equipo podría estar diseñado para tolerar la máxima presión para un escenario en particular.

Un verdadero diseño inherentemente más seguro no tendría escenarios para un evento inicial específico.

En el segundo caso las compañías les asignan PFD a ciertas características al diseño del proceso (fallas que se han observado en la industria), en tal caso, las empresas consideran dichas características como IPL's permitiendo comparar a la compañía el riesgo entre los diferentes diseños de las plantas que emplean estándares diferentes para el equipo. La desventaja de este caso es que a la larga podrían requerir IPL's adicionales para el equipo con mayor índice de falla. Por ejemplo una bomba podría tener un impulsor demasiado pequeño para generar alta presión en un recipiente de flujo descendente o

puede tener un impulsor más grande durante la reparación o mantenimiento del recipiente.

Se puede utilizar cualquiera de los dos métodos, pero debe ser consistente para alcanzar los resultados dentro de cada organización.

Sistema de Control de Proceso Básico (BPCS)

Es el primer nivel de protección durante la operación normal, se diseña para mantener el proceso en la región de operación segura. La falla del BPCS puede ser un evento inicial cuando se considera utilizar un BPCS como una IPL, el analista debe evaluar el acceso y la seguridad al control ya que el error humano puede disminuir la actuación del BPCS.

Alarmas Críticas e Intervención Humana

Son el segundo nivel de protección durante la operación normal y deben activarse por el BPCS. La acción del operador, iniciada por alarmas o por observación, puede acreditarse como una IPL cuando se satisfacen algunos criterios para asumir la efectividad de la acción.

Función Instrumentada de Seguridad (SIF)

Una SIF es una combinación de sensores, resolvers lógicos, y elementos finales con un nivel de integridad de seguridad específico que detecta una condición fuera de límites (anormal) y que lleva al proceso a un estado funcionalmente seguro. Una SIF normalmente se considera como una IPL, es importante aclarar que al conjunto de dos o más SIF's se le denomina SIS.

Protección Física (Válvulas de Escape, Discos de Ruptura, etc.)

Estos dispositivos son protecciones activas, ya que cuando se dimensionan, diseñan y mantienen apropiadamente, son IPL's que pueden proveer un alto nivel de protección contra la sobrepresión de servicios limpios, aunque, pueden ocurrir consecuencias adicionales que requerirán examinarse, sin embargo, su efectividad puede disminuirse en servicios sucios o corrosivos, o si las actividades de inspección y mantenimiento son de mala calidad.

Protección Post-descarga (Diques, Muros anti-explosión, etc.)

Son dispositivos pasivos que proveen un alto nivel de protección si se diseñan y mantienen correctamente. Asimismo, los sistemas de rociadores, los sistemas de espuma, o sistemas de detección de gas, etc., cumplen con los requerimientos de IPL's en escenarios específicos.

Respuesta de Emergencia de la Planta y la Comunidad

Estas funciones (brigadas contra incendio, sistemas manuales de rociadores, evacuación de instalaciones, evacuaciones de la comunidad etc.) no se consideran normalmente como IPL's ya que se activan después de la descarga inicial y existen demasiadas variables (por ej. retrasos de tiempo) que afectan su efectividad general para mitigar un escenario. En el anexo C se resumen salvaguardas que normalmente no se consideran IPL's.

4.4.2. Requerimientos de las salvaguardas para ser consideradas IPL's

Para ser considerado como IPL, un dispositivo, sistema o acción debe ser [9]:

- Efectiva para evitar la consecuencia cuando funcione conforme al diseño,
- Independiente del evento inicial y los componentes de cualquier otra IPL que haya sido declarada para el mismo escenario,
- Auditable; la efectividad supuesta en términos de prevención de consecuencias y la PFD debe ser capaz de validación de algún tipo (por medio de documentación, revisión, prueba, etc.).

Cuando se están analizando las salvaguardas si son o no IPL's, es importante buscar modos de falla de causa común (CCF), ya que pueden involucrar al evento inicial y uno o más salvaguardas o la interacción de varias, si las salvaguardas son afectadas por la CCF solo deben considerarse como una IPL única en lugar que cada salvaguarda se acredite como una IPL.

Efectividad

Si un dispositivo, sistema o acción se acredita como una IPL, debe ser efectiva para evitar la consecuencia indeseable asociada con el escenario. Para determinar si una salvaguarda es una IPL, se utilizan las siguientes preguntas para guiar al equipo o analista para realizar el juicio apropiado [9].

- ¿La salvaguarda puede detectar la condición para la cual es requerida? Esta puede ser una variable del proceso, o una alarma, etc. si la salvaguarda no siempre puede detectar la condición, y generar una especificación, no es una IPL.
- ¿La salvaguarda puede detectar la condición a tiempo para tomar acciones correctivas que evitarán la consecuencia indeseable? El tiempo requerido debe incluir:
 - ❖ el tiempo para detectar la condición,
 - ❖ el tiempo para procesar la información y tomar una decisión,
 - ❖ el tiempo para tomar la acción requerida, y
 - ❖ el tiempo para que haga efecto la acción
- ¿La IPL tiene capacidad adecuada para que ésta tome la acción requerida en el tiempo disponible? ¿Si se requiere un tamaño específico (por ej. orificio de la válvula de escape, volumen del dique, etc.), la salvaguarda instalada cumple con estos requerimientos? ¿La fuerza de la IPL es adecuada para la acción requerida? La fuerza de una IPL puede consistir en:
 - ❖ fuerza física (por ej. un muro contra explosión o dique);
 - ❖ la capacidad de una válvula para cerrar bajo las condiciones que estarían presentes para un escenario específico (esto es, fuerza del resorte de la válvula, actuador o componentes);
 - ❖ fuerza humana (esto es, ¿la tarea requerida está dentro de las capacidades físicas de todos los operadores?).

Si la salvaguarda no puede cumplir con estos requerimientos no es una IPL.

La determinación o especificación de un valor apropiado para la PFD de una IPL es una parte importante del proceso LOPA para reducir la frecuencia de

una consecuencia, aunque se requiere precaución cuando se asigna la PFD para IPL's en escenarios donde la frecuencia del evento inicial es alta.

Independencia

El método LOPA utiliza la independencia para asumir que los efectos del evento inicial, u otras IPL's, no interactúan con una IPL específica para que realice la función de manera efectiva.

La independencia requiere que la efectividad de una IPL sea independiente de:

- La ocurrencia, o consecuencia de un evento inicial; y
- La falla de cualquier componente de una IPL ya acreditada para el mismo escenario.

Es importante entender cuándo una salvaguarda puede o no declararse como una IPL en el LOPA.

En la siguiente Figura se ilustran dos eventos iniciales, los cuales representan una reacción exotérmica en un reactor, donde en uno de ellos una salvaguarda es una IPL añadiendo algún material para enfriar la reacción y para el otro caso no lo es debido a que para añadir dicho material requiere de energía eléctrica, dado que el evento inicial de este escenario es la pérdida de electricidad haciendo la IPL dependiente.

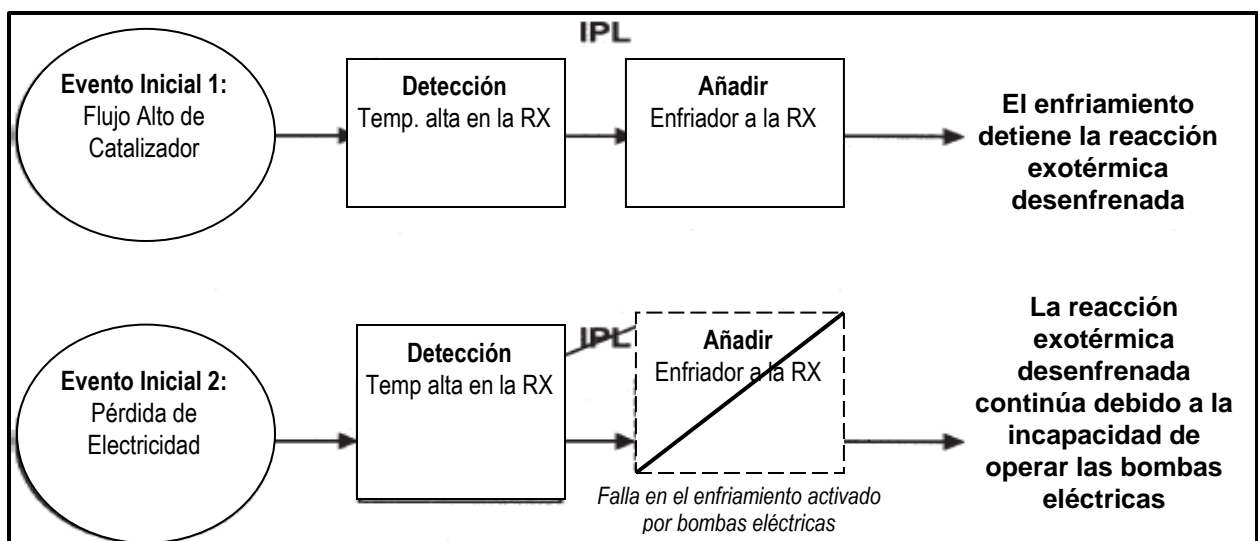


Figura 17. Ejemplo de IPL no independiente del evento inicial

Cuando se analizan lazos de control BPCS o SIF's para decidir cuantas IPL's existen para un escenario en particular, se utilizan dos métodos para evaluar la independencia (método A y B). El método A se recomienda generalmente porque sus reglas son claras y es conservador. El método B puede utilizarse si el analista es experimentado y existen datos adecuados disponibles sobre el diseño y desempeño real del resolovedor lógico BPCS.

Un dispositivo, sistema o acción no es independiente del evento inicial y no puede acreditarse como una IPL para ningún método (A o B) en las siguientes condiciones:

- El error del operador es el evento inicial y el candidato de IPL supone que el mismo operador debe actuar para mitigar la situación. El error humano es equivalente a la falla de un sistema y una vez que un humano ha cometido un error, no es razonable esperar que el mismo operador actúa correctamente más adelante en la secuencia de eventos. Este método se justifica porque el error puede ser causado por enfermedad, incapacidad (drogas o alcohol), distracción, sobrecarga de trabajo, inexperiencia, instrucciones de operación fallidas, falta de conocimiento, etc. que todavía están presentes más adelante cuando se requiere la acción.
- La falta de un servicio (electricidad, aire, agua de enfriamiento, nitrógeno, etc.) es el evento inicial y un candidato a IPL es un sistema que depende de ese servicio.
- Múltiples medidores de flujo, analizadores, etc., con error de calibración debido a error humano, instrumentos de calibración defectuosos, etc.;
- Unidades múltiples o sistemas SIF con una sola fuente de poder o un circuito breaker común, a menos que se pueda determinar que la falla en la acción es segura siempre se inicie en caso de pérdida de electricidad (esto es cierto para cualquier otro servicio requerido para que una IPL alcance un estado seguro);
- Deficiencia funcional en un tipo de válvula, sensor, etc. Utilizado en sistemas múltiples;

- Suponer que el mismo operador actúa correctamente después de que un error del operador inició el evento.

Método A

Para que un dispositivo o acción se acredite como una IPL, debe ser independiente de:

- El evento inicial y cualquier evento habilitador y
- Cualquier otro dispositivo, sistema o acción que ya haya sido acreditada como un IPL para el mismo escenario

Este método es conservador, dado que permite únicamente una IPL en un BPCS único y requiere que la IPL sea independiente del evento inicial. Este método elimina muchas fallas de causa común que afectan la PFD de las IPL's declaradas, además, es más directo para aplicarse dado que sus reglas no son ambiguas y deja poco juicio en manos del analista o equipo.

Método B

Permite que más de una IPL estén en el mismo BPCS o permite una IPL con un evento inicial (con independencia requerida para ciertos componentes), ya que el método se basa en el supuesto de que si una función BPCS falla, es probable que el componente que falla sea el dispositivo de detección o el elemento final de control, dado que sus índices de falla son normalmente mucho mayores que el índice de falla del resolvidor lógico.

El método es menos directo de aplicarse dado que requiere:

- Información sobre el diseño y desempeño del BPCS,
- Entendimiento total de los modos de falla de causa común sobre la PFD para una IPL, y
- Un analista con experiencia con la definición y aplicación de las reglas para declarar una salvaguarda como una IPL.

Un ejemplo de la aplicación de ambos métodos es el siguiente. El lazo de control de nivel BPCS para un tanque utiliza la válvula de llenado para

mantener el nivel a un punto deseado, el escenario es el derrame del tanque, como evento inicial es la falla del lazo de control de nivel. Las salvaguardas son: un desconector (interruptor) de alto nivel en el BPCS que utiliza una función para detener la bomba y una segunda función es cerrar la válvula de llenado cuando se detecta un nivel alto. Sin embargo, ambas funciones utilizan el mismo sensor de nivel y una falla en el sensor o en el BPCS ocasionarían que los elementos finales no llevaran a cabo su objetivo.

De igual manera podrían existir dos sensores, pero el BPCS y el elemento final de control son comunes, en la Figura 18 se resumen ambos arreglos.

Los arreglos mostrados no son independientes de otra IPL utilizando tanto el método A como el método B. En el primer arreglo, el resolvidor lógico y el sensor son comunes. Sin embargo, si se utilizan sensores diferentes para la función BPCS que cierra la válvula y la función BPCS que detiene la bomba, el Método B podría permitir que cada una de estas funciones se declaren como IPLs diferentes a pesar de que el resolvidor lógico BPCS sea común a ambas.

De manera similar, para el segundo arreglo de la Figura 18, el uso de elementos finales de control duales, uno para cada función BPCS, podría permitir que se declaren dos IPLs utilizando el Método B.

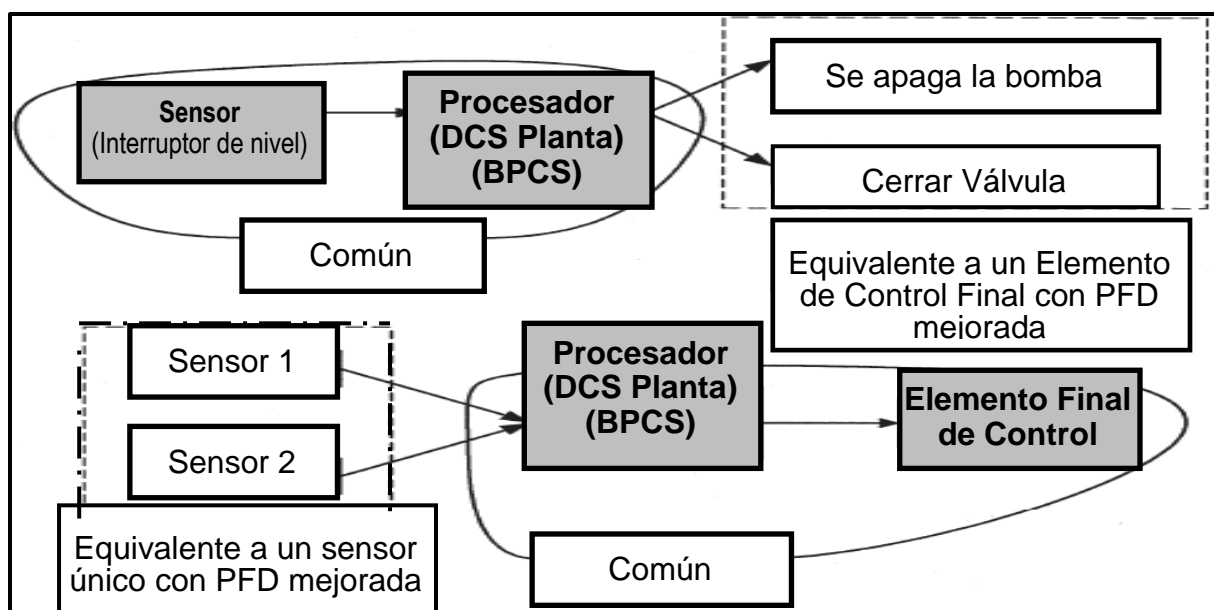


Figura 18. Elementos de sensor común y resolvidor lógico en lazo BPCS utilizando el Método A

Auditabilidad

Un componente, sistema o acción debe ser auditable para demostrar que una IPL cumple con los requerimientos siguientes:

- Mitigación del riesgo
- Confirmar la efectividad para evitar la consecuencia
- Confirmar que el diseño de la IPL, la instalación, las pruebas funcionales y los sistemas de mantenimiento se establezcan para alcanzar la PFD especificada para la IPL en cuestión
- Las pruebas funcionales deben confirmar que todos los componentes de una IPL (sensores, resolvers lógicos, elementos finales, etc.) son operativos y cumplen con los requerimientos para que se aplique el LOPA
- Documentar la condición de la IPL como se encuentre, así como cualquier modificación hecha desde la última auditoría, y monitorear cualquier acción correctiva hasta su resolución

4.4.3. Evaluaciones y características de las IPL's en el LOPA

Los requerimientos básicos de efectividad, independencia y auditabilidad para una IPL se determinan por medio de diversos métodos. El más simple es utilizar una base de diseño por escrito o una hoja resumen de la IPL, la cual debe estar disponible para revisión del equipo o analista del LOPA, tal como se ilustra en la Tabla 7. Cualquier supuesto, clarificación o cálculos requeridos para respaldar el análisis debe adjuntarse o referenciarse, en caso de que la información no esté disponible o si su validez es cuestionable, entonces debe desarrollarse para cada escenario.

Si se está considerando una SIF como una IPL, la documentación debe incluir [9]:

- Una declaración del propósito de la función instrumentada de seguridad,
- Los detalles de la especificación y la instalación de cada uno de sus componentes incluyendo el resolvable lógico, y

- Registros de las pruebas y validación de la SIF, o los componentes, habiendo alcanzado la PFD requerida o supuesta, para ello existen estándares y certificaciones como ISA e IEC

Alternativamente, si una organización cuenta con una serie de especificaciones publicadas para los sistemas SIF, se aceptaría una certificación de que el sistema cumple con los requerimientos para un tipo de SIF específica.

Si se está considerando un dispositivo de alivio de presión como una IPL, la documentación debe incluir:

- La base del diseño (dimensionamiento),
- Escenarios de diseño (todos los escenarios que requieran que se abra la válvula),
- La especificación de la válvula,
- El flujo requerido en las condiciones del escenario,
- Los detalles de la instalación (por ej. arreglos de tubería), y
- Los procedimientos de pruebas y mantenimiento, incluyendo prueba de la capacidad de la válvula a la presión establecida.

Cuando se acredite la acción humana como una IPL, se deben definir y documentar los siguientes factores

- Cómo se detectará la condición,
- Cómo se tomará la decisión de actuar, y
- Qué acción se tomará para evitar la consecuencia

Cuando se consideran IPL's en un cierto escenario, existen palabras clave para eliminar salvaguardas que no son requeridas, dichos conceptos clave determinan las características que debe contar una IPL, las cuales son:

Las “tres Ds” ayudan a determinar si un candidato es una IPL:

Detectar La mayoría de los IPL's detectan una condición en el escenario.

Decidir Muchas IPL's toman la decisión sobre actuar o no.

Desviar Todas las IPL's desvían el evento indeseable evitándolo.

Los “**tres suficientes**” ayudan a evaluar la efectividad de una IPL:

¿**Suficientemente grande**?

¿**Suficientemente rápida**?

¿**Suficientemente fuerte**?

La “**Gran I**” es un recordatorio de que la IPL debe ser independiente del evento inicial y otras IPLs.

4.4.4. *Valor de la PFD*

La efectividad de una IPL se califica en términos de su probabilidad de falla en la demanda. La PFD de una IPL usualmente se relaciona con su frecuencia de prueba, mientras más largo sea el periodo entre pruebas, más alto será la PFD, cuando la frecuencia de la demanda para una IPL sea similar a la frecuencia de la prueba de la misma, se debe tener cuidado en asignar la PFD apropiada. La falla puede ser ocasionada por múltiples factores, aunque, puede ser causada por:

- Un componente de una IPL esté en un estado defectuoso o inseguro cuando ocurra el evento inicial; o
- Un componente falle durante la realización de su tarea, o
- La intervención humana falle en su eficacia, etc.

En particular, la PFD para una función BPCS incluye factores como error humano en la programación, la omisión de una SIF, y los sistemas de seguridad típicos que se establecen para controlar el acceso al resolovedor lógico. En el anexo D se proporcionan valores de PFD para algunas IPL's empleadas por la industria.

Cabe señalar que cada organización debe contar con valores de PFD según los criterios de tolerancia al riesgo, se debe desarrollar la documentación para justificar o sustanciar la PFD declarada para las IPL's. Esto debe referenciar estándares corporativos, normas industriales, o incluir cálculos apropiados.

Para el caso de válvulas de alivio declaradas como IPL's la justificación de la PFD es importante para servicios poliméricos, sucios o corrosivos.

4.4.5. Ejemplos de IPL's

IPL's Pasivas

Estos dispositivos pretenden evitar la consecuencia indeseable (fugas, daño de explosión para proteger equipo y edificios, exposición al fuego para contenedores o tuberías, incendio o una onda expansiva que pase a través de un sistema de tuberías, etc.), sin embargo, puede haber otras consecuencias menos serias (como un incendio dentro de un dique, daño de explosión para algún equipo) que debe analizarse en otros escenarios.

Algunos ejemplos son diques, muros de explosión o bunkers, protección contra incendios, supresores de flama o detonación, etc. En algunas compañías, las funciones de diseño de procesos (como materiales especiales e inspección) se consideran como IPL's si pueden evitar que ocurra la consecuencia asignándoles PDF's apropiados, esto permite que una organización evalúe las diferencias de riesgo entre plantas que utilizan estándares diferentes para los equipos.

IPL's Activas

Se requieren IPL's activas para pasar de un estado a otro en respuesta a un cambio en una propiedad medible de un proceso (por ej. temperatura o presión), o una señal de otra fuente (como un botón o un interruptor). En la Figura 19 se ilustran los componentes que generalmente comprende.

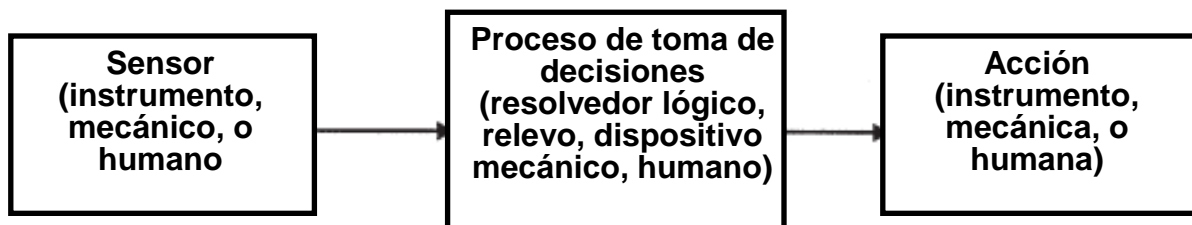


Figura 19. Componentes básicos de una IPL activa

Sistemas instrumentados

Los sistemas instrumentados (combinación de sensores, resolvedores lógicos, controladores de procesos, y elementos finales que trabajan juntos), ya sea para regular operaciones de la planta de manera automática o para evitar la ocurrencia de un evento específico se dividen en dos tipos. El primero se le denomina controlador continuo, éste generalmente provee retroalimentación continua al operador si el sistema está funcionando normalmente (por ej. el controlador de proceso que regula el flujo, la temperatura, o presión a un valor establecido por el operador).

El segundo, es el controlador de estado (el resolvedor lógico toma medidas de proceso y ejecuta cambios encendido-apagado a indicadores de alarma y a válvulas del proceso) monitorea las condiciones de la planta y únicamente toma acciones de control cuando se alcanzan puntos de interrupción predefinidos. Se les puede referir a las acciones de control de estado como SIF's, tal ejemplo es un desconector de alta temperatura del reactor que cierra la válvula de vapor [9].

Tanto controladores continuos como de estado se encuentran en el BPCS y el SIS.

Sistema Básico de Control de Proceso (BPCS)

Este sistema monitorea y controla continuamente el proceso en la operación diaria de la planta. El BPCS podría proveer tres diferentes tipos de funciones de seguridad que pueden ser las IPL's [9]:

- Acción de control continuo, el cual mantiene el proceso en sus valores de inicio dentro del rango de operación normal y así intenta evitar la progresión de un escenario anormal después de un evento inicial.
- Controladores de estado (resolvedor lógico o unidades de alarma de interrupción), los cuales identifican valores del proceso más allá de los límites normales y proveen esta información (normalmente, como mensajes de alarma) al operador, quien se espera que tome una acción correctiva específica (controlar el proceso o apagarlo totalmente).
- Controladores de estado (resolvedor lógico o relevos de control), los cuales se pretende que tomen una acción automática que interrumpa el proceso, en lugar de que se intente regresar el proceso dentro del rango

de operación normal. Esta acción debe resultar en un apagado total, cambiar el proceso a un estado seguro.

Cabe resaltar que los BPCS son IPL's relativamente débiles ya que tienen una capacidad de prueba limitada, la seguridad es restringida contra cambios no autorizados al programa lógico y debido que el IEC limita la PFD a no menos de 1×10^{-1} para todos los BPCS que puedan aplicarse a un escenario, añadiendo además el error humano.

Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)

Es una combinación de sensores, resolvedores lógicos y elementos finales que acciona una o más funciones instrumentadas de seguridad (SIF's). Las SIF's son funciones del control de estado, en ocasiones llamadas interlocks de seguridad y alarmas críticas de seguridad. Los requerimientos de diseño que se emplean tanto para SIS y SIF's son el ISA S84.01, ISA TR84.00.02, IEC 61508 e IEC 61511.

Los detalles importantes de diseño incluyen lo siguiente [9]:

- SIF's que son funcionalmente independientes del BPCS. Los dispositivos de medición, procesadores lógicos, y elementos finales de control utilizados para una SIF se aíslan de dispositivos similares en el BPCS, excepto donde se pueden compartir señales sin sacrificar la PFD de la SIF.
- Un resolvedor lógico de sistema (normalmente comprenden en múltiples procesadores repetidos, fuentes de alimentación redundantes, y una interfaz humana) que procesa varias (o muchas) funciones instrumentadas de seguridad.
- Uso extensivo de componentes repetidos y rutas de señales. La redundancia puede alcanzarse de muchas maneras. La más obvia es instalar sensores múltiples o múltiples elementos finales (por ej. válvulas) para el mismo servicio. Diversas tecnologías reducirán fallas de causa común para componentes redundantes.

- Uso de arquitecturas lógicas y de inspección que son tolerantes a las fallas de algunos componentes sin que la efectividad de la SIS se vea comprometida y sin causar falsas interrupciones del proceso.
- Uso de autodiagnósticos para detectar fallas de sensores, del resolvidor lógico y elementos finales de control. Tal cobertura de diagnóstico puede reducir el tiempo medio para reparar SIF's fallidas a únicamente unas pocas horas. Las pruebas internas y resolvidores lógicos múltiples pueden ocurrir muchas veces por segundo.
- Una filosofía sin corriente eléctrica para interrupciones donde se requiere una PFD baja.

Es importante indicar que cada una de las SIF's tendrá su propio valor de PFD con base en [9]:

- El número y tipo de sensores, resolvidores lógicos, y elementos finales de control; y
- El intervalo de tiempo entre las pruebas periódicas de funcionalidad de los componentes del sistema.

El desempeño de la reducción del riesgo de una SIF se han agrupado en categorías llamadas Niveles de Integridad de la Seguridad (SIL's), estas se definen en la Tabla D-2 del anexo.

Salvaguardas Instaladas por el Proveedor

Muchos componentes del equipo se suministran con distintas salvaguardas y sistemas SIF's diseñados por los proveedores del equipo. Ejemplos incluyen [9]:

- Equipo contra incendios - sistemas de administración de quemadores incluyendo vigías de fuego, ciclos de purga, etc. en un escenario que involucra una explosión potencial en una caldera, si se alimenta un gas combustible a los quemadores sin que funcionen los pilotos, el sistema de administración de quemadores sería una IPL si se diseñan, instalan, mantienen e integran en el sistema de seguridad adecuadamente.

- Equipo Rotativo – interruptores de vibración, detección de alta temperatura, protección contra exceso de velocidad, protección contra sobrecargas, etc. En un escenario donde puedan surgir graves pérdidas de producción como resultado de daño a un compresor grande, los SIF's provistos por el proveedor serían IPL's si se diseñan, instalan, mantienen, e integran en el sistema de seguridad adecuadamente.

En caso de considerar tales dispositivos como IPL's para la metodología del LOPA deben de cumplir con la efectividad, la independencia del evento inicial o de cualquier otra IPL ya considerada para el escenario y la validación de alguna forma de la efectividad que tiene contra la consecuencia (ser auditable).

Sistemas de espuma y otros Sistemas de Combate para mitigar Incendios

Muchas industrias dada su experiencia con estos sistemas, indican que usualmente deben considerarse salvaguardas en lugar de IPL's para respuestas a incendios, descargas, etc., ya que existe una posibilidad de volverlos ineficaces por el daño proveniente del incendio o explosión.

Por otro lado, otras industrias las consideran como IPL's si se instalan sistemas bien diseñados, si se proporciona el mantenimiento adecuado y si cumplen con los requerimientos del LOPA de las salvaguardas para ser consideradas IPL's.

Dispositivos de Alivio de Presión

Los sistemas de alivio pretenden proveer protección contra la sobrepresión, pero el flujo de alivio eventualmente se manda a la atmósfera. Esto puede resultar en escenarios adicionales (por ej. nube tóxica, nube inflamable, descarga ambiental, falla de la válvula para cerrarse después de una demanda), los cuales se debe de determinar la frecuencia de la consecuencia del nuevo escenario y determinar si se necesitan otras IPL's. Dos dispositivos que normalmente se emplean en el proceso son válvulas de alivio y discos de ruptura instalados individualmente o en combinación.

La mayor parte de los códigos empleados para recipientes a presión, requieren que las válvulas de alivio se diseñen para todos los escenarios (incendio, pérdida de enfriamiento, falla de la válvula de control, etc.) y no comentan ningún otro requerimiento, esto implica que la válvula de alivio sea la única IPL que se necesite para la protección contra la sobrepresión.

Para el LOPA se debe evaluar el valor apropiado para una PFD para cada servicio, dado que la acción humana interactúa con la instalación y mantenimiento de las válvulas de alivio. En particular, las válvulas de alivio con fallas, corrosión, flujo bifásico, o donde pueda ocurrir el congelamiento de material en el cabezal de alivio, ya que esto provoca no alcanzar el flujo esperado. La PFD en el análisis LOPA para estos dispositivos por lo general es mayor de lo previsto.

Cuando se utilizan discos de ruptura para proteger el equipo, conducen a escenarios más complejos.

IPL's Humanas

Involucran la confianza en los operadores, u otro miembro del staff para tomar acción para prevenir una consecuencia indeseable, en respuesta a alarmas o siguiendo una chequeo de rutina del sistema. En general, el desempeño humano usualmente se considera menos confiable que los controles de ingeniería y se debe tener gran cuidado cuando se considera la efectividad de la acción humana como una IPL, en la Tabla D-3 se ejemplifican algunas capas que se pueden emplear en el proceso, mientras que en la Tabla C-1 se ilustran algunas salvaguardas que no son IPL's.

Las acciones humanas deben tener las siguientes características [9]:

- La indicación de una acción requerida por el operador debe ser detectable. La indicación siempre debe ser/estar:
 - ❖ disponible para el operador,
 - ❖ claras para el operador incluso bajo condiciones de emergencia,
 - ❖ simples y fáciles de entender

- El tiempo disponible para tomar acción debe ser adecuado. Esto incluye el tiempo necesario para decidir que se requiere acción y el tiempo necesario para tomar la acción. Mientras más tiempo disponible para tomar acción, menor la PFD dada para acción humana como una IPL. La toma de decisión para el operador no debe requerir:
 - ❖ ningún cálculo o diagnóstico complicado,
 - ❖ ningún balance de costos de interrupción de producción contra seguridad
- No debe esperarse que el operador realice otras tareas al mismo tiempo que la acción requerida por la IPL, y la carga normal de trabajo del operador debe permitir que el operador esté disponible para actuar como una IPL
- El operador es capaz de tomar la acción requerida bajo todas las condiciones que se esperen que estén razonablemente presentes. Como ejemplo, una IPL propuesta donde se le requiera a un operador que escale una plataforma para abrir una válvula. En caso de que un incendio (como evento inicial) pueda evitar esta acción, no sería apropiado considerar la acción del operador como una IPL. Se realiza capacitación regularmente para la acción requerida y ésta se documenta. Esto debe involucrar simulacros de acuerdo con las operaciones de operación escritas, así como auditorías regulares para demostrar que todos los operadores a la unidad puedan realizar las tareas requeridas cuando se les alerte por la alarma específica.
- La indicación, la acción, deben ser independientes normalmente de cualquier alarma, instrumentada, SIF u otro sistema ya acreditado como parte de otra IPL o secuencia de eventos iniciales

4.4.6. *Comparación entre IPL's Preventivas e IPL's de Mitigación*

Algunas capas pretenden prevenir que ocurra el escenario y pueden ser llamadas IPL's preventivas. Otras capas pueden llamarse IPL's de mitigación y pretenden reducir la gravedad de la consecuencia del evento inicial. Las IPL's de mitigación reducen la frecuencia del escenario de alta consecuencia original, pero permiten que ocurra una consecuencia menos grave.

Cada escenario menos grave adicional resultante de una IPL de mitigación sería diferente del primer escenario y requeriría su propio análisis. Algunas compañías han determinado que ciertos tipos de consecuencias menos severas no necesitan estudios adicionales, por ejemplo un derrame dentro de un dique de un líquido inflamable a temperatura por debajo de su punto de ebullición normal.

Ejemplos de IPL's preventivas son SIF's (por ej. cierre de válvulas de vapor, flujo de agua de enfriamiento de emergencia, adición de inhibidor) que detendrían una reacción desenfrenada y evitar sobrepresión. Si éstas funcionan entonces la reacción se detendrá sin la ruptura de un contenedor o emisión a la atmósfera.

Ejemplos de IPL's de mitigación son dispositivos de alivio de presión que pretenden evitar la ruptura catastrófica de un contenedor, pero cuya operación satisfactoria resulta en otras consecuencias.

4.5. Determinación de la Frecuencia de Escenarios

Una vez que se identifican los escenarios y las capas protección independientes, se procede a calcular la frecuencia para el escenario mitigado, esto es de suma importancia ya que se emplea para la toma de decisiones. Los cálculos se pueden aplicar para un sistema o diseño existente (tal como está) y para el sistema o diseño después de que se incorporan los cambios recomendados (mitigado). Los cálculos pueden ser cuantitativos utilizando estimaciones numéricas o pueden utilizarse tablas de búsqueda.

Las ecuaciones descritas a continuación suponen que todas las IPL's son verdaderamente independientes (premisa básica del LOPA).

4.5.1. Cálculo Cuantitativo del Riesgo y de la Frecuencia

Cálculo General

Este procedimiento para calcular la frecuencia para un escenario, se realiza multiplicando la frecuencia del evento inicial por las PFD's de las IPL's.

$$f_i^c = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij} \quad (4 - 1)$$

Donde

f_i^c es la frecuencia para la consecuencia C para el evento inicial i

f_i^I es la frecuencia del evento inicial para el evento inicial i

PFD_{ij} es la probabilidad de falla sobre demanda de la j-ésima IPL que protege contra la consecuencia C para el evento inicial i.

Esta ecuación aplica para situaciones de baja demanda, esto es, la frecuencia del evento inicial es menor que dos veces la frecuencia de prueba para la primera IPL, por ejemplo, la frecuencia con que se prueba una SIF para prevenir un derrame al momento del llenado de un reactor batch son dos veces al año, siendo que la SIF se demanda una vez al año en el proceso.

El resultado de la ecuación se puede utilizar como información de entrada para comparar el riesgo del escenario con los criterios de tolerancia al riesgo de la organización.

Cálculo de la Frecuencia de Resultados Adicionales

Algunas compañías calculan únicamente la frecuencia de una descarga utilizando solamente la ecuación (4-1), dicha ecuación puede ser mejorada para englobar otros posibles resultados ocasionados por una descarga como:

- Efectos inflamables como incendio o explosión,
- Efectos tóxicos donde aplique,
- Exposición a efectos tóxicos o inflamables,
- Lesión o fatalidad.

Para calcular la frecuencia de tales resultados, la ecuación (4-1) se modifica multiplicando la frecuencia del escenario de descarga por las probabilidades apropiadas para el resultado de interés, estas pueden incluir:

- La probabilidad de ignición ($P^{\text{ignición}}$) para descargas inflamables,

- La probabilidad de que el personal esté en el área afectada ($P^{persona\ presente}$) un parámetro precursor para calcular exposiciones y lesiones, y
- La probabilidad de que ocurra una lesión ($P^{lesión}$), para lesión o fatalidad

Las siguientes ecuaciones determinan la frecuencia para un solo escenario y sistema individual.

$$f_i^{incendio} = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignición} \quad (4 - 2)$$

$$f_i^{exposición\ a\ incendio} = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignición} \times P^{persona\ presente} \quad (4 - 3)$$

$$f_i^{lesión\ por\ incendio} = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignición} \times P^{persona\ presente} \times P^{lesión} \quad (4 - 4)$$

$$f_i^{tóxico} = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{persona\ presente} \times P^{lesión\ (tóxico)} \quad (4 - 5)$$

De la ecuación 4-3 a la 4-5 determinan la frecuencia para una sola persona. La probabilidad de ignición y la probabilidad de que haya un persona presente son frecuencias ligadas al evento inicial, esto puede ocasionar un incremento en una o ambas probabilidades, por lo que se debe tener cuidado en identificar tales ligas.

La probabilidad de ignición depende de cómo se dispersa la descarga y de la localización de las fuentes de ignición. Para los propósitos del LOPA, se puede usar un estimado conservador de la probabilidad de ignición para situaciones típicas. Por ejemplo, una organización puede usar:

- 1.0 para descargas causadas por colisión,
- 1.0 para descargas grandes cerca de equipo incendiado,
- 0.5 para descargas en áreas generales de proceso,

- 0.1 para descargas en áreas remotas de proceso

El valor de la probabilidad usada para una persona presente es de 1.0, o cuando el individuo inicie el escenario, por ejemplo, para una descarga en el área de operación es que un operador abra una válvula de purga .

La probabilidad de una lesión tóxica para la mayoría de las situaciones es 0.5 y 1.0 para situaciones en las que es difícil detectar el vapor, el vapor actúa rápidamente o las rutas de escape son difíciles de usar.

En la siguiente Figura se muestra un árbol de decisión como ejemplo para la probabilidad de ignición de un vapor inflamable

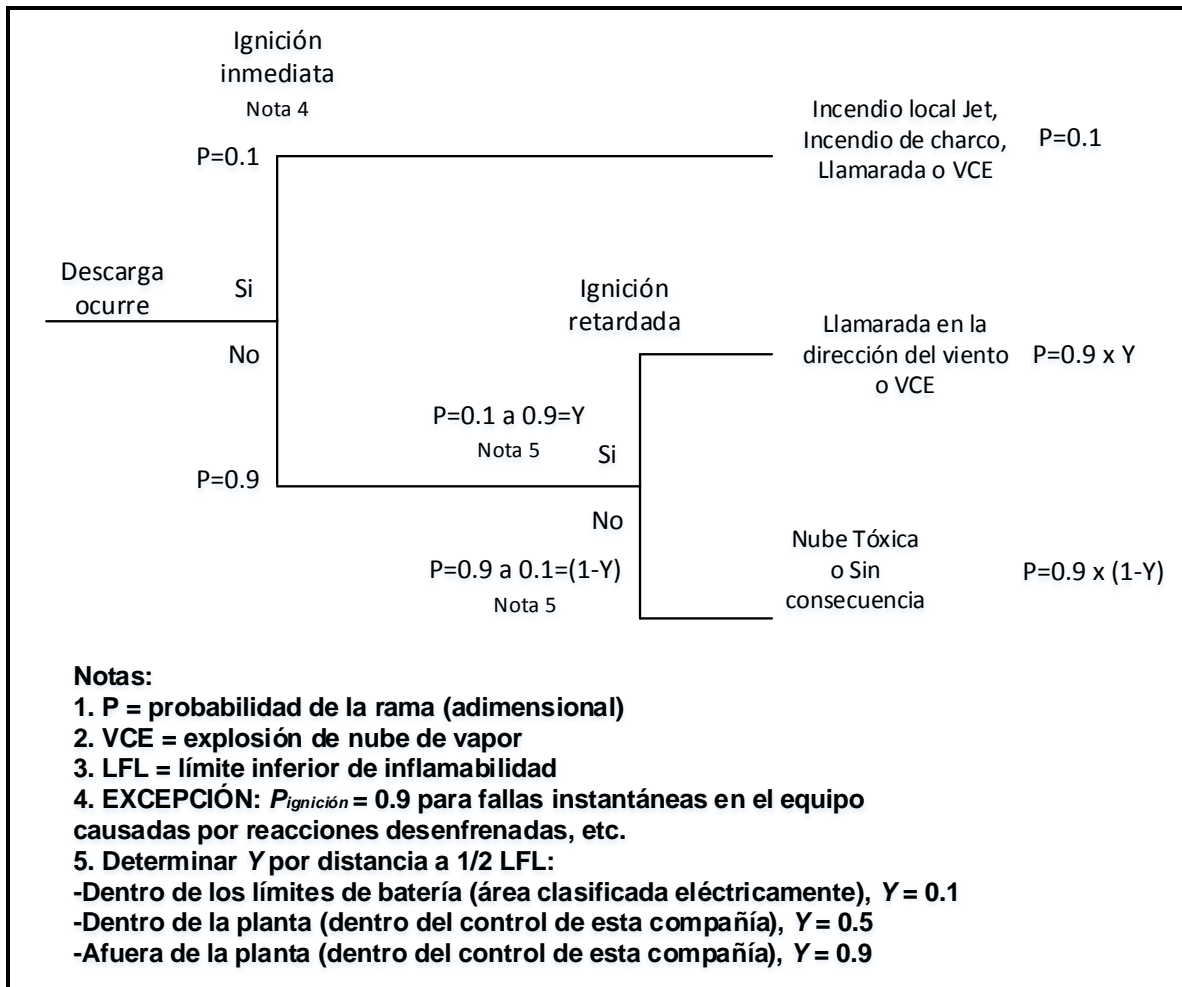


Figura 20. Ejemplo de árbol de decisión para probabilidad de ignición para vapor inflamable. Empezando desde la izquierda, cada rama muestra la probabilidad de resultado. (Si ocurre la descarga, la probabilidad de ignición inmediata es 0.1)

Cada compañía puede elegir un método conservador para determinar las probabilidades de $P^{\text{lesión}}$, $P^{\text{persona presente}}$, $P^{\text{ignición}}$, o puede establecer criterios para categorías diferentes para estas tres probabilidades.

Cálculo del Riesgo

La frecuencia del resultado de interés se multiplica por un factor relacionado con la magnitud de las consecuencias

$$R_k^C = f_k^C \times C_k \quad (4 - 6)$$

Donde

R_k^C es el índice de riesgo del resultado del incidente de interés k, expresado como una magnitud de consecuencias por unidad de tiempo. Las unidades específicas variarán en el riesgo que se estima. Algunos ejemplos podrían incluir riesgo de fatalidad por año, número de fatalidades por año, pérdida económica en dólares por mes, libras de contaminante descargados por día, incendios por año, lesiones por año,

f_k^C es la frecuencia del resultado del incidente de interés k, en unidades de tiempo inversas, por ej. año⁻¹, hora⁻¹, etc.,

C_k es una medida específica de las consecuencias del resultado del incidente de interés k. Algunas medidas de las consecuencias podrían ser una fatalidad individual, número de fatalidades, dólares de pérdida económica, libras de descarga de un contaminante, número de personas expuestas a una concentración específica de un contaminante aéreo. El C_k podría expresarse como una categoría.

Suma de las Frecuencias para Escenarios Múltiples

Algunas compañías tienen criterios de riesgo geográfico o criterios personales de riesgo, para utilizar tales criterios de riesgos para la toma de decisiones es necesario sumar las frecuencias de todos los escenarios que afectan el área geográfica o a la gente bajo consideración [9]:

- En la misma área geográfica,

- En la misma unidad de proceso (por ej. varias líneas de reactores),
- Afectando la misma localidad de interés,
- En la misma gravedad de la consecuencia

Para sumar las frecuencias de varios escenarios, primero se deben evaluar individualmente utilizando la ecuación (4-1), dado que pueden aplicar IPL's diferentes para escenarios diferentes, incluso si varios escenarios resultan en la misma consecuencia. La frecuencia de la consecuencia puede aproximarse, si las f_i son pequeñas, utilizando:

$$f^C = \sum_{i=1}^I f_i^C = f_1^C + f_2^C + \dots + f_I^C \quad (4 - 7)$$

Donde f_i^C es la frecuencia de la C-ésima consecuencia para el i-ésimo evento inicial.

Las ecuaciones (4-1) a (4-7) se pueden utilizar para calcular cualquier riesgo deseado, como por ejemplo, seguridad en el proceso, impacto ambiental, impacto al negocio, calidad, etc.

Cálculo de la Frecuencia para escenarios de Alta demanda del Evento Inicial

El "modo de alta demanda" ocurre cuando la frecuencia de desafío de una IPL es mayor que el doble de la frecuencia de prueba para la primera IPL. Por ejemplo, se prueba la IPL una vez al año y existen más de dos demandas por año. Utilizando la ecuación (4-1) resulta una frecuencia excesivamente alta para la consecuencia, en lugar de utilizar dicha ecuación la frecuencia de la consecuencia o frecuencia de desafío para la siguiente IPL es dada por:

$$2 \times (\text{frecuencia de prueba de la IPL, por año}) \times (\text{PFD de la primera IPL}) \quad (4 - 8)$$

El término (4-8) se sustituye por los términos de la frecuencia del evento inicial y la PFD de la primera IPL de la ecuación (4-1), que dando la ecuación de la siguiente manera:

$$f_i^C = 2 \times (f \text{ de prueba de la IPL por año}) \times (\text{PFD de la IPL}) \times \text{PFD}_{i2} \times \dots \times \text{PFD}_{ij} \quad (4 - 9)$$

La ecuación (4-9) provee resultados de frecuencia más realistas, a diferencia de emplear la ecuación (4-1).

Por otra parte Trevor Kletz presenta una fórmula para calcular la frecuencia de las consecuencias tanto para baja demanda y alta:

$$f_i^C = f_i^{IPLi1} \left(1 - e^{-\frac{DT}{2}} \right) \quad (4 - 10)$$

Donde

f_i^C es la frecuencia para la consecuencia C para el evento inicial i

f_i^{IPLi1} es la frecuencia de falla para la IPL que protege contra la consecuencia para el evento inicial i.

D es la frecuencia del evento inicial (año^{-1})

T es el intervalo de prueba para la IPL (año)

4.5.2. *Determinación del Riesgo o Frecuencia del escenario por medio de Tablas de Búsqueda*

El riesgo del escenario o la frecuencia puede determinarse cualitativamente utilizando tablas de búsqueda. Normalmente, son matrices donde incluyen un número objetivo (o requerido) de IPL's para diferentes categorías de riesgo. Algunas matrices pueden incluir la frecuencia de la consecuencia. Las categorías en la matriz pueden incluir [9]:

- La frecuencia del evento inicial para el escenario,
- La gravedad de la consecuencia del escenario,
- El número requerido de IPL's (o créditos de IPL) para una categoría de riesgo dado (la categoría de riesgo se da por la frecuencia del evento inicial y la gravedad de la consecuencia para el escenario),
- La frecuencia de la consecuencia.

Las tablas de búsqueda (tal como se ilustra en la Tabla 8) proporcionan información en forma de créditos de IPL, los créditos en cuestión de la IPL se calcula a partir de su PFD, por lo que:

$$1 \text{ crédito IPL} \equiv 1 \times 10^{-2} \text{ PFD}$$

$$(4 - 11)$$

Tabla 8. Créditos de IPL

IPL	PFD	Número de Créditos IPL
Dique	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1-1.5
Supresores de llama/detonación	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1-1.5
Válvula de alivio	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$	0.5-2.5
Disco de ruptura	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$	0.5-2.5
SIF SIL 1	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$	0.5-1
SIF SIL 2	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1-1.5
SIF SIL 3	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$	1.5-2
Acción humana con 10 minutos de tiempo de respuesta	$1.0 - 1 \times 10^{-1}$	0-0.5

4.5.3. Cálculo del Riesgo o Frecuencia con Logaritmos Enteros

Como primera aproximación, el riesgo o frecuencia del escenario puede calcularse utilizando el valor absoluto del logaritmo de la frecuencia del evento inicial y las PFD's de las IPL's. Una frecuencia de evento inicial de 1×10^{-2} año⁻¹ se convierte en 2 y una PFD de 1×10^{-2} se convierte en 2 [9].

Se debe tener cuidado cuando se tiene un número decimal, este debe cambiarse a un dígito entero, por ejemplo, 0.1×10^{-3} se convierte a 1×10^{-4} , además cuando el resultado del logaritmo es decimal se debe redondear al entero más próximo, así, 3×10^{-2} año⁻¹ se expresa como 2. Para emplear este tipo de cálculo la ecuación (4-1) se modifica, ésta se expresa de la siguiente manera:

$$F_i^C = F_i^I + \sum_{j=1}^J P'_{ij} \quad (4 - 12)$$

Donde

F_i^C es el exponente de la frecuencia para la consecuencia C del escenario i,

F_i^I es el valor absoluto del logaritmo de la frecuencia del evento inicial i , y

P'_{ij} es el valor absoluto del logaritmo de la PFD de la j -ésima IPL que protege contra el escenario i .

Mientras más grande sea el exponente calculado por la ecuación, menor será la frecuencia. Un exponente de frecuencia de $F_i^C = 4$ representa una frecuencia de 1×10^{-4} año⁻¹

4.6. Tomando decisiones de Riesgos usando LOPA

La toma de decisiones se lleva a cabo después de que los escenarios se han desarrollado completamente y se han calculado todos los riesgos existentes. Al final de un estudio, ya sea cualitativo, semicuantitativo o cuantitativo, las decisiones relacionadas con riesgos normalmente recaen en una de las tres categorías:

1. Gestionar el riesgo residual – continuar con los sistemas de gestión que mantengan el riesgo en su nivel actual (presumiblemente tolerable).
2. Modificar (mitigar) el riesgo para hacerlo tolerable.
3. Abandonar el riesgo (negocio, proceso, etc.) porque es demasiado alto.

Las decisiones para abandonar las operaciones, normalmente se toman como resultado de otros estudios, como una evaluación cuantitativa del riesgo. El LOPA, usualmente se aplica para determinar si un escenario está dentro de los criterios de tolerancia al riesgo o si un riesgo debe ser reducido. En conjunto con el LOPA se utilizan tres tipos básicos de juicio que se toman en consideración para el riesgo:

1. Comparar el riesgo calculado con criterios de tolerancia al riesgo predeterminados
2. Opinión de expertos (personas calificadas en evaluaciones de riesgos), es usado en la industria para tener una versión más completa del análisis LOPA
3. Comparación entre las diferentes alternativas (IPL's) para la reducción del riesgo

Algunos métodos para tomar decisiones y poder alcanzar niveles de riesgo ALARP son:

- Métodos Matriciales
- Criterios Numéricos (Riesgo Máximo Tolerable por Escenario)
- Número de Créditos IPL
- Juicio de Expertos
- Análisis Costo-Beneficio para comparar Alternativas
- Criterios de Riesgo Acumulado frente a Criterios de Escenario

Un factor importante en el uso de cualquier método de decisión sobre riesgos es el juicio. El uso del juicio requiere un buen entendimiento del proceso que se está analizando y la efectividad relativa de las diferentes capas de protección halladas durante el análisis (desarrollo de IPL's) [9]. Las reglas del LOPA y los criterios para los riesgos bien definidos reducen subjetivamente el proceso de toma de decisiones, llevando a decisiones más rápidas, defendibles y consistentes.

Lo que complica la toma de decisiones es la multiplicidad de otros factores que pueden influir en el análisis en cuestión. Tales factores incluyen [18]:

- Las alternativas disponibles para reducir o eliminar los riesgos
- Disponibilidad del capital
- Códigos, normas y reglamentos y buenas prácticas de la industria
- Sociedad y / o responsabilidades
- Imagen de la empresa
- Costos de implementación de las alternativas disponibles
- Impacto económico de la actividad en la comunidad local
- Nivel de frecuencia (s) del riesgo
- Número de personas en riesgo
- Rentabilidad de la actividad
- Número máximo de personas afectadas por un solo evento
- Tipo (s) de riesgo, como la mortalidad humana, lesiones y daños al medio ambiente. etc.

Los factores mencionados anteriormente, solo son algunas de las posibles causas que pueden complicar la toma de decisión si no se tienen protocolos para la evaluación de los diversos análisis de riesgos que se pueden realizar en una organización.

4.6.1. Métodos matriciales

Son métodos generalizados para mostrar visualmente la frecuencia tolerable para un escenario con base en la gravedad de la consecuencia y la frecuencia del escenario (se presenta un ejemplo en la Tabla 9). En dicha matriz, cada celda se asocia con un grado de reducción del riesgo requerido para un escenario

Se pueden emplear también matrices donde se visualice el daño al negocio, lesiones, fatalidades, posibles daños a la infraestructura, entre otros. El método matricial es el más ampliamente usado para tomar decisiones de riesgos con el LOPA.

4.6.2. Método de Criterios Numéricos (Riesgo Máximo Tolerable por Escenario)

Algunas compañías han desarrollado criterios de riesgo con base en un riesgo máximo tolerable por escenario, basado en una variedad de categorías de consecuencia. Por ejemplo, una organización puede establecer como su criterio una frecuencia máxima (por año o por 1,000 horas) de una fatalidad individual (en los empleados, para contratistas o personas fuera de la planta). Otros pueden elegir frecuencia de descargas de materiales peligrosos, o pérdida en dólares por daño a la propiedad, esto va depender de la organización en cuestión.

Tabla 9. Ejemplo de Matriz de Riesgos con Zonas de Acción Individuales

Frecuencia de la consecuencia (por año) ¹	Categoría de la consecuencia		Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
	Categoría 1	Categoría 2			
10 ⁻⁰	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)	Acción inmediata (notificar a la gerencia corporativa)	Acción inmediata (notificar a la gerencia corporativa)
10 ⁻¹	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)	Acción inmediata (notificar a la gerencia corporativa)
10 ⁻²	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)
10 ⁻³	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)
10 ⁻⁴	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)
10 ⁻⁵	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)
10 ⁻⁶	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional
10 ⁻⁷	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional

* Por ejemplo, 10⁻² equivale a 1/100 años

4.6.3. Número de Créditos IPL

Algunas compañías han incorporado los criterios tolerables de riesgo en tablas, que especifican el número de créditos IPL de manera explícita para escenarios de ciertos niveles de consecuencia y frecuencia. Normalmente se proveen valores tabulares para el número del IPL's requeridas para rangos de frecuencia de evento inicial (tal como la Tabla 10) y para los valores de créditos IPL para las diversas capas de protección (como en la Tabla 8).

Tabla 10. Número de Créditos IPL Requeridos para diversas Frecuencias

Frecuencia Ajustada de Evento Inicial**	Número de Créditos	IPL Requeridos*
	Consecuencia Categoría IV Una Fatalidad	Consecuencia Categoría V Fatalidades múltiples
Frecuencia $\geq 1 \times 10^{-2}$	2	2.5
$1 \times 10^{-2} > \text{Frecuencia} \geq 1 \times 10^{-3}$	1.5	2
$1 \times 10^{-3} > \text{Frecuencia} \geq 1 \times 10^{-4}$	1	1.5
$1 \times 10^{-4} > \text{Frecuencia} \geq 1 \times 10^{-6}$	0.5	1
$1 \times 10^{-6} > \text{Frecuencia}$	0	0.5

* La Frecuencia Ajustada de Evento Inicial incluye ajustes a la frecuencia del evento inicial para $P^{\text{ignición}}$,

$P^{persona}$ y $P^{fatalidad}$

** Un Crédito IPL se define como una reducción en la frecuencia del evento de 1×10^{-2} .

Se pueden desarrollar tablas similares para otro tipo de consecuencias, como pérdida en la producción, impacto ambiental, lesiones, fatalidades múltiples dentro o fuera de las instalaciones, por mencionar algunos.

4.6.4. *Juicio de Expertos*

Se necesita el juicio experto cuando los criterios específicos de tolerancia al riesgo no están disponibles o no se establecen fácilmente debido al tipo de proceso que se está analizando o los peligros involucrados [9].

El equipo de PHA puede usar técnicas del LOPA para determinar los escenarios y las IPL's, y realizar cálculos de frecuencia. Sin embargo, las decisiones relacionadas con la necesidad de IPL's adicionales, y la naturaleza de tal protección adicional, usualmente estarán basadas en las recomendaciones de un experto en evaluación del riesgo. El experto compararía las IPL's y otras características del escenario con la práctica en la industria, procesos similares, u otros puntos de referencia en su experiencia [9].

4.6.5. *Análisis Costo-Beneficio para comparar Alternativas*

Este análisis compara el costo de la consecuencia evitada contra el costo de la implementación de las IPL's para reducir el riesgo, esta herramienta se puede aplicar en todos los métodos de toma de decisiones. El análisis costo-beneficio generalmente es el método utilizado para seleccionar las IPL's para reducción del riesgo entre las IPL candidatas.

4.6.6. *Criterios de Riesgo Acumulado frente a Criterios de Escenario*

Alguna compañías han desarrollado criterios de riesgos basados en un riesgo máximo tolerable por unidad, por área geográfica, o riesgo acumulado por persona (esto es, el riesgo para un trabajador específico es menor que x para la suma de todos los escenarios que podrían afectar a esa persona). Por ejemplo se puede usar la evaluación del riesgo total (sumar todos los riesgos calculados de los escenarios mediante la aplicación de los pasos del LOPA)

para un edificio poblado y compararlo contra el criterio de riesgo acumulado de las instalaciones desarrollado por la compañía.

Cuando se usan criterios de tolerancia al riesgo acumulado, en ocasiones es más difícil evaluar cada escenario individual, dado que más escenarios implican riesgo tolerable menor para cada escenario. La toma de decisiones puede ser más difícil dado que se involucra el riesgo total de muchos escenarios en la decisión sobre el riesgo.

5. APLICACIÓN DEL MÉTODO LOPA

En el siguiente ejemplo se muestran los pasos de la metodología LOPA aplicados al desbordamiento de un tanque que contiene hexano [9].

Diseño

El hexano fluye desde otra unidad de proceso (no mostrada) hacia un tanque de almacenamiento de hexano. La tubería de suministro de hexano siempre está bajo presión. El nivel del tanque de almacenamiento se controla por medio de control de nivel (LIC-90) que detecta dicha propiedad en el tanque y activa una válvula de estrangulación (LV-90) para controlar el nivel. El hexano se usa por un proceso de flujo descendente (tampoco mostrado). El controlador LIC-90 incluye una alarma de alto nivel (LAH-90) para alertar al operador. El tanque opera normalmente medio lleno; la capacidad total del tanque es de 80,000 lb de hexano. El tanque se localiza en un dique que puede contener hasta 120,000 lb de hexano.

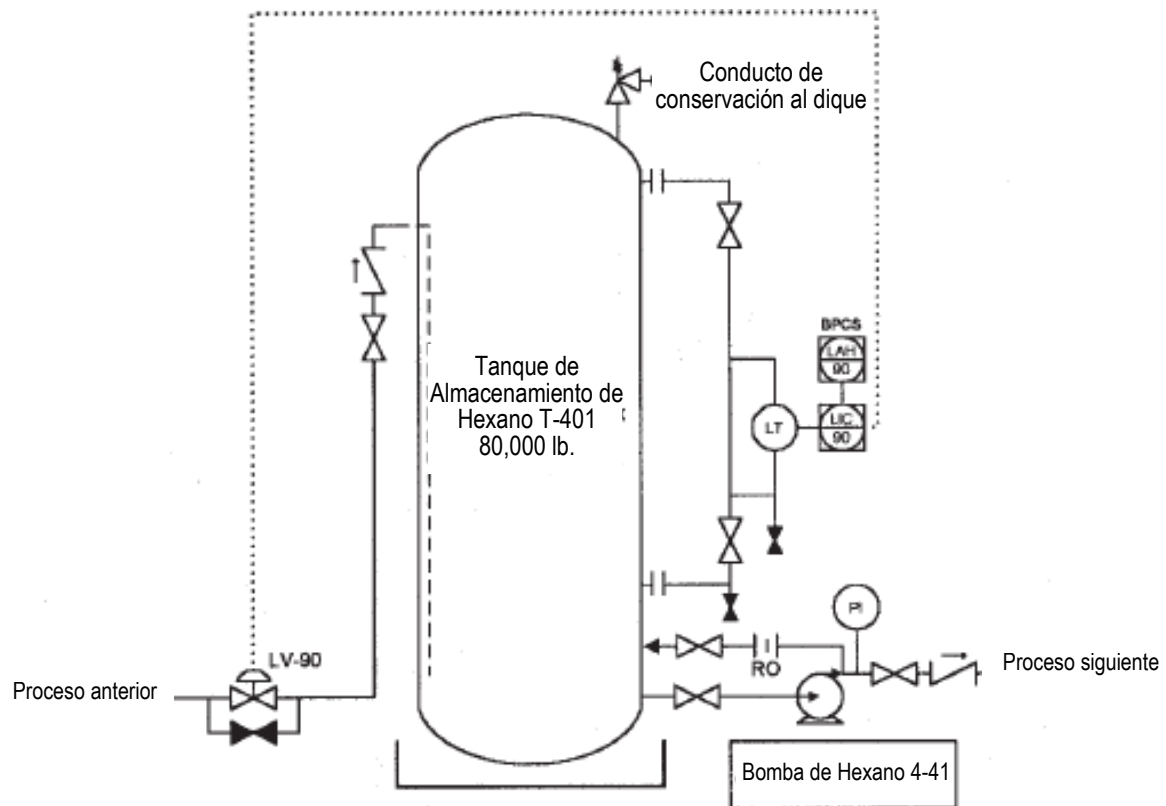


Figura 21. Desbordamiento de Tanque de Compensación de hexano

Alcance

Este ejemplo provee una ilustración limitada del LOPA para una decisión de la seguridad de un proceso basada en el uso de una función instrumentada de seguridad (SIF) como capa de protección independiente (IPL). Durante el análisis de riesgos del proceso (PHA), el equipo discutió la necesidad de una SIF para ayudar a prevenir accidentes de sobrellenado. Decidieron utilizar el LOPA para ayudar a estructurar esta decisión de seguridad del proceso, es importante mencionar que solo se analizara el escenario donde el derrame de hexano no es contenido por el Dique.

Información del riesgo

La información del riesgo se preparó como parte del PHA (HAZOP), antes de dirigir el LOPA (tal como se muestra en la Tabla 11). Esto incluyó identificación de los riesgos, escenarios, consecuencias, salvaguardas, y recomendaciones subsecuentes. Las consecuencias identificadas son: desbordamiento del

tanque; posible falla del dique; y subsecuente dispersión de vapores inflamables de hexano, los cuales en caso de ignición, resultarían en un incendio de charco.

Tabla 11. HAZOP para elegir el escenario

No.	Desviación	Causa	Consecuencias	Salvaguarda	Recomendaciones
1.1	Flujo alto	La válvula de control de flujo se transfiere o se abre	Alto nivel – Tanque de Almacenamiento de Hexano T-401		
1.2	Flujo bajo o nulo	Flujo bloqueado (por ej. línea tapada) Válvula de bloqueo manual de flujo descendente cerrada inadvertidamente o falla de la puerta Presión baja (ver 1.7)	Nivel bajo – Tanque de Almacenamiento de Hexano T-401 Sobrecalentamiento potencial y falla del sello de bombeo de flujo ascendente fuera del límite de batería del estudio (OSBL)		
1.3	Flujo reverso	Presión baja (ver 1.7)	Pérdida posible de contención (ver 1.9)	Válvula de retención	
1.4	Alta temperatura	Ninguna causa creíble identificada			
1.5	Baja temperatura		Ninguna consecuencia de interés		
1.6	Presión alta		Ninguna consecuencia de interés		
1.7	Presión baja	Bomba de flujo ascendente (OSBL) falla	Flujo bajo o nulo (ver 1.2) Flujo reverso (ver 1.3)	Manómetro local en la descarga de la bomba de flujo ascendente (OSBL)	
1.8	Alta concentración de contaminantes		Ninguna consecuencia de interés – contaminación en flujo descendente, posiblemente resultando en descomposición de la unidad		
1.9	Perdida de contención	Corrosión /erosión Fuego externo Impacto externo Falla de la junta, empaque o sello Martillo hidráulico	Emisión de hexano; riesgo de fuego afectando un área grande (consecuencia categoría 4 o 5)	Respuesta de la operación/ mantenimiento conforme a lo requerido, incluyendo aislamiento si se necesita Capacidad para aislar la línea manualmente	



Descripción del escenario

El derrame de hexano no es contenido por el Dique, el desbordamiento total puede ser tan grande como 40,000 lb de hexano, y que el dique se presenta como una IPL.

Paso 1 del Método LOPA: Estimación de las consecuencias y la gravedad

Empleando el Método 1, para categorizar las consecuencias obtenemos la siguiente Tabla.

Tabla 12 Categorización de Consecuencias (Matriz de Riesgos)

Característica de la descarga	Tamaño de la descarga (más allá del dique)					
	Descarga de 1 a 10 libras	Descarga de 10 a 100 libras	Descarga de 100 a 1,000 libras	Descarga de 1,000 a 10,000 libras	Descarga de 10,000 a 100,000 libras	Descarga > a 100,000 libras
Extremadamente tóxica sobre BP*	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 5	Categoría 5	Categoría 5
Extremadamente tóxica debajo de BP o altamente tóxica sobre BP	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 5	Categoría 5
Altamente tóxica debajo de BP o inflamable sobre BP	Categoría 2	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 5
Inflamable debajo de BP	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
Líquido combustible	Categoría 1	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4

*BP = punto de ebullición

Característica de la Consecuencia	Magnitud de la Pérdida					
	Equipo con refacciones o no esencial	Cierre de la planta < 1 mes	Cierre de la planta de 1 a 3 meses	Cierre de la planta > 3 meses	Ruptura del recipiente 3,000 a 10,000 gal 100-300 psi	Ruptura del recipiente > 10,000 gal > 300 psi
Daño mecánico a una planta principal de producción	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 4	Categoría 4	Categoría 5
Daño mecánico a una planta pequeña de producción individual por producto	Categoría 2	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 4	Categoría 5

Característica de la Consecuencia	Costo de la consecuencia (dólares norteamericanos)				
	\$0-\$10,000	\$10,000-\$100,000	\$100,000-\$1,000,000	\$1,000,000-\$10,000,000	>\$10,000,000
Costo total del evento	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5

Utilizando este método la categoría de la consecuencia de la Tabla 12 para una descarga de 40,000 lb de un líquido inflamable debajo de su punto de ebullición es Categoría 4.

Utilizando el Método 3

Utilizando este método se descarga hasta 40,000 lb de hexano que puede resultar en un incendio de charco. En vista de la baja volatilidad del hexano, no se espera una nube inflamable más allá del charco. No se considera probable una llamarada, con base en el punto de inflamación del hexano a temperaturas del proceso. El incendio tiene la capacidad de lesionar al personal en el área inmediata al derrame, lo cual ahora incluye un área más allá del dique, este método se aplica directamente en el paso 5.

Paso 2 del Método LOPA: Desarrollo de Escenarios

Como este es un proceso continuo, el control del nivel del líquido en el tanque es un proceso dinámico que depende de que la instrumentación actúe. El

dique tiene capacidad adecuada para contener el desbordamiento por un periodo de tiempo suficiente para que el operador detecte el derrame para el índice normal de flujo hacia el tanque. El evento inicial para este ejemplo es una falla del LIC 90 (un lazo de control BPCS), el cual incluye fallas en la instrumentación y errores del operador si el control del nivel se pone en manual o se omite. Esto puede conducir al sobrellenado del tanque y a un derrame dentro del dique alrededor del tanque. El tamaño o tipo de la consecuencia depende de si el dique contiene al derrame o no.

El evento inicial es la falla del lazo de control de nivel conduciendo al desbordamiento del tanque y una descarga fuera del dique debido a una falla de esta protección. La consecuencia (dependiendo del método adoptado) es una descarga, o un incendio fuera del dique con posibles lesiones o muertes. Las salvaguardas existentes, las cuales son candidatas para ser IPL's en este escenario, incluyen intervención humana (respuesta del operador a alarmas vía el BPCS, y procedimientos), y el dique.

En la siguiente Tabla, se muestran diferentes causas y consecuencias que pueden formar varios escenarios.

Tabla 13. HAZOP previo a la evaluación por el Método LOPA (Línea desde el “proceso anterior” hasta el Tanque de Hexano)

No.	Desviación	Causa	Consecuencias	Salvaguarda	Recomendaciones
1.1	Flujo alto	La válvula de control de flujo se transfiere o se abre	Alto nivel – Tanque de Almacenamiento de Hexano T-401 (ver 2.1)		
1.2	Flujo bajo o nulo	Flujo bloqueado (por ej. línea tapada) Válvula de bloqueo manual de flujo descendente cerrada inadvertidamente o falla de la compuerta Presión baja (ver 1.7)	Nivel bajo – Tanque de Almacenamiento de Hexano T-401 (ver 2.2) Sobrecalentamiento potencial y falla del sello de bombeo de flujo ascendente fuera del límite de batería (OSBL) del estudio		
1.3	Flujo reverso	Presión baja (ver 1.7)	Pérdida posible de contención (ver 1.9)	Válvula de retención	
1.4	Alta temperatura	Ninguna causa creíble identificada			

1.5	Baja temperatura		Ninguna consecuencia de interés		
1.6	Presión alta		Ninguna consecuencia de interés		
1.7	Presión baja	Bomba de flujo ascendente (OSBL) falla	Flujo bajo o nulo (ver 1.2) Flujo reverso (ver 1.3)	Manómetro local en la descarga de la bomba de flujo ascendente (OSBL)	
1.8	Alta concentración de contaminantes		Ninguna consecuencia de interés – contaminación en flujo descendente, posiblemente resultando en descomposición de la unidad		
1.9	Perdida de contención	Corrosión /erosión Fuego externo Impacto externo Falla de la junta, empaque o sello Martillo hidráulico <i>(continúa en la siguiente página)</i>	Emisión de hexano; riesgo de fuego afectando un área grande (consecuencia categoría 4 o 5)	Respuesta de la operación/ mantenimiento conforme a lo requerido, incluyendo aislamiento si se necesita Capacidad para aislar la línea manualmente	
No.	Desviación	Causa	Consecuencias	Salvaguarda	Recomendaciones
1.9 Cont.	Perdida de contención	Mantenimiento inapropiado Falla en la instrumentación o línea de instrumentación Defecto en los materiales Expansión térmica con bloqueo en el equipo en flujo reverso (ver 1.3)		Válvula de retención para evitar un reflujo grande a causa de la ruptura de la línea Investigaciones sobre corrosión Inspecciones no destructivas periódicas	
2.1	Nivel alto	Flujo alto – Línea desde el “proceso anterior” hasta el Tanque de Almacenam. T-401 (ver 1.1)	Presión alta (ver 2.5)	Indicador de nivel con alarma de alto nivel (audible en cuarto de control) Procedimientos de operación de la unidad	Considerar instalar un SIS para cerrar el flujo de entrada en alto nivel en T-401
2.2	Nivel bajo	Flujo bajo o inexistente – Línea desde el “proceso anterior” hasta el Tanque de Almacenam. T-401 (ver 1.2)	Sin consecuencias de seguridad – potencial interrupción en el proceso si no se rellena antes de que la alimentación descendente vacíe el tanque		

2.3	Temperatura alta	Ninguna causa creíble identificada			
2.4	Temperatura baja	Temperatura ambiente baja mientras que haya agua contaminada en el tanque (ver 2.7)	Posible congelamiento del agua acumulada en el fondo del tanque o en la línea de drenado del tanque o líneas de instrumentación, resultando en fractura de la línea de drenado y pérdida de contención (ver 2.8)		
2.5	Presión alta	Nivel alto (ver 2.1)	Descarga de hexano a través de la válvula de seguridad hacia el dique del tanque; riesgo de incendio afectando un área grande si no lo contiene el dique (consecuencia categoría 4 o 5) Pérdida de contención (si la causa de sobrepresión excede el nivel de presión del tanque) (ver 2.8)		
No.	Desviación	Causa	Consecuencias	Salvaguarda	Recomendaciones
2.6	Presión baja	Tanque bloqueado antes del enfriamiento, después de la salida de vapor	Daño en el equipo como resultado del colapso del tanque en vacío	Procedimientos estándar y lista de palomeo para la salida de vapor de los contenedores	
2.7	Alta concentración de contaminantes	Agua no drenada completamente después de la salida del vapor o el lavado	Posible congelamiento del agua acumulada en el tanque durante un periodo de baja temperatura ambiental (ver 2.4)		
2.8	Pérdida de contención	Corrosión /erosión Fuego externo Impacto externo Falla de la junta, empaque o sello Mantenimiento inapropiado Falla en la instrumentación o su línea Defecto en los materiales Fuga en la válvula de la estación de muestreo Fuga en la válvula de drenaje o descarga Baja temperatura (ver	Descarga de hexano; riesgo de incendio afectando un área grande, particularmente si la capacidad del dique se excede (consecuencia categoría 4 o 5)	Respuesta de operación/mantenimiento conforme se requiera, incluyendo aislamiento si es necesario Capacidad de aislar el tanque manualmente Inspección no-destructiva periódica por prácticas API recomendadas y código ASME Válvula de escape	

<p>2.4) Presión alta (si la causa de sobrepresión excede el nivel de presión del tanque (ver 2.5)</p>	<p>descarga al dique del tanque Dique dimensionado para 120,000 lb de hexano (1.5 veces la capacidad del tanque) Procedimientos de respuesta de emergencia</p>
---	--

Paso 3 del Método LOPA: Identificación de la Frecuencia del Evento Inicial

Para el escenario de desbordamiento del tanque que resulta de una falla en la instrumentación, el evento inicial obvio es la falla en el indicador/controlador del nivel del tanque (LIC 90). Su frecuencia de evento inicial es, de la Tabla B-1:

$$f^1 = 1 \times 10^{-1} \text{ /año índice de falla del lazo de control}$$

Paso 4 del Método LOPA: Identificación de las Capas de Protección Independientes

EVENTO INICIAL

El evento inicial es la falla del lazo de control de nivel BPCS. Esto significa que no se puede dar crédito al resolvidor lógico BPCS como parte de cualquier otra IPL. Alternativamente, una falla de causa común (pérdida de energía eléctrica, daño en cableado, etc.) podría ser la causa de falla del lazo de control de nivel BPCS y todos, o muchos otros lazos asociados con el sistema, de nuevo, vuelven inútiles otras potenciales IPL's basadas en BPCS.

IPL's ESTABLECIDAS

Una vez que ha ocurrido el derrame del tanque, el dique está en su lugar para contenerlo. Solo si el dique falla en operar ocurrirá un derrame con el potencial de incendio, daño y fatalidades. El dique cumple con los requerimientos para una IPL por las siguientes razones:

- Será efectivo para contener el derrame del tanque si opera conforme al diseño.
- Es independiente de cualquier otra IPL y del evento inicial.
- Su diseño, construcción, y condición actual puede auditarse.

Para los propósitos de este ejemplo al dique se le asigna una PFD de 1×10^{-2} (ver Tabla D-1); esto es, fallará en contener el derrame una vez cada 100 ocasiones que se le desafíe.

SALVAGUARDAS QUE NO SON IPL's PARA LOPA

Un equipo de evaluación de riesgos puede haber considerado alarmas generadas por el BPCS y subsecuentes acciones humanas como salvaguardas. En este ejemplo, no se da crédito a las acciones humanas como IPL por las siguientes razones:

- El operador no siempre está atendiendo y por consiguiente no se puede suponer que la acción del operador sería efectiva para detectar y evitar un derrame, independientemente de cualquier alarma, antes de que haya alcanzado una etapa donde ocurriría una descarga significativa si el dique fallara.
- Debe suponerse que la falla del lazo de control de nivel BPCS (evento inicial) resulte en la falla del sistema para generar una alarma que habilitaría al operador para tomar acción manual para detener el flujo al tanque. En consecuencia, cualquier alarma generada por el BPCS no sería completamente independiente del sistema BPCS (utilizando el Método A) y por consiguiente no podría acreditarse como una IPL. El Método B podría permitir el uso de una alarma generada BPCS diferente con intervención humana como una IPL.

La válvula de alivio en el tanque no será efectiva para evitar el derrame del tanque, y en consecuencia, no es una IPL para este escenario.

IPL's PROPUESTAS

Para métodos que requieren de reducción del riesgo la instalación existente no ofrece oportunidades para desarrollar una IPL con el BPCS u operador existentes utilizando el Método A como la instrumentación existente, el BPCS y operadores se involucran ya sea con el evento inicial o con las IPL's existentes. De este modo, se debe añadir equipo adicional para reducir el riesgo. Un método es instalar una SIF con una PFD de 1×10^{-2} para disminuir la frecuencia de la consecuencia. Para cumplir con los requerimientos para una IPL con esta PFD la SIF puede requerir:

- Un dispositivo de medición de nivel independiente, diferente de cualquier otro dispositivo de medición de nivel existente ya establecido en el tanque.
- Un resolvidor lógico para procesar la señal del apagador de nivel y enviar una señal para la acción si se detecta un alto nivel. Este resolvidor lógico debe ser independiente del sistema BPCS existente. Puede ser apropiado utilizar un resolvidor lógico de sistema de seguridad con múltiples procesadores con capacidades de auto-pruebas. Si no se elige este, entonces el resolvidor lógico debe ser capaz de alcanzar el desempeño PFD requerido para que toda la SIF cumpla con la cifra supuesta de PFD de al menos 1×10^{-2} .
- Un elemento final adicional para aislar el flujo al tanque (cierre de bomba, válvula de aislamiento, etc.) activado por el resolvidor lógico al recibir la señal del nuevo dispositivo de medición de nivel. Este elemento final debe ser independiente de cualquier sistema instalado para detener el flujo hacia el tanque.
- Un protocolo de prueba específico para todos los componentes en el sistema SIF para permitir que se alcance la cifra general PFD.
- Documentación de la SIF, requerimientos de prueba y los resultados de las pruebas.

Nota: Si se utiliza el Método B podría ser posible añadir únicamente un sensor individual independiente y declarar la acción del operador en respuesta a la

alarma de alto nivel como una IPL. La PFD para esta IPL dependería del tiempo disponible para que responda el operador a la alarma para evitar un derrame significativo en caso de que el dique falle en contener el derrame.

Paso 5 del Método LOPA: Determinación de la Frecuencia de Escenarios

Ahora podemos calcular las frecuencias de los escenarios mitigados con las IPL's establecidas.

Frecuencia de la consecuencia fuera del dique debido a la falla del LIC 90:

- Descarga (para este cálculo se toma como consecuencia el Método 1 del paso 1 y el empleo de la ecuación 4-1)

$$f_1^{descarga} = f_1^{falla LIC 90} \times PFD_{dique}$$

$$f_1^{descarga} = \left(\frac{1 \times 10^{-1}}{\text{año}} \right) \times (1 \times 10^{-2}) = \frac{1 \times 10^{-3}}{\text{año}}$$

- Incendio (se utiliza la ecuación 4-2)

$$f_1^{incendio} = f_1^{falla LIC 90} \times PFD_{dique} \times P^{ignición}$$

$$f_1^{incendio} = \frac{1 \times 10^{-1}}{\text{año}} \times (1 \times 10^{-2}) \times (1.0) = \frac{1 \times 10^{-3}}{\text{año}}$$

- Fatalidad debida a incendio (aplicación del método 3 del paso 1, utilizando la ecuación 4-4)

$$f_1^{fatalidad de incendio} = f_1^{falla LIC 90} \times PFD_{dique} \times P^{ignición} \times P_{persona} \times P^{fatalidad}$$

$$f_1^{fatalidad de incendio} = \frac{1 \times 10^{-1}}{\text{año}} \times (1 \times 10^{-2}) \times (1.0) \times (0.5) \times (0.5) = \frac{2.5 \times 10^{-4}}{\text{año}}$$

Por otro lado, utilizando el método de numero de créditos de IPL's se tiene que para este cálculo la gravedad de la consecuencia se clasifica por el criterio de frecuencia de fatalidad (Método 3 del paso 1), a diferencia del cálculo anterior las PFD de las IPL's no se utilizan, en lugar de eso se utiliza la frecuencia ajustada del evento inicial como información de entrada para emplear la Tabla 10.

$$f^1_{ajustada} = f^1 x P^{ignicion} x P^{persona presente} x P^{lesion}$$

$$f^1_{ajustada} = \frac{1x10^{-1}}{año} x (1.0) x (0.5) x (0.5) = \frac{2.5x10^{-2}}{año}$$

Empleando el método del logaritmo entero, para este caso, la gravedad de la consecuencia se clasifica por el método de categorización de la consecuencia de la matriz de riesgos (Método 1 del paso 1)

La frecuencia del evento inicial es $1x10^{-1}/año$ en que falla el LIC-90; el valor absoluto del logaritmo es 1. La PFD del dique es $1x10^{-2}$ por lo que el valor absoluto del logaritmo de la PFD es 2. El exponente de la frecuencia de la consecuencia mitigada es dada por $1+2=3$, equivale a $1x10^{-3}/año$ para la descarga fuera del dique

Paso 6 del Método LOPA: Tomando decisiones de Riesgos

Como falla el LIC del tanque, la descarga no es contenida por el dique, y el derrame se enciende. Como se muestra en la Tabla 12, la descarga de 40,000 lb de un líquido inflamable por debajo de su punto de ebullición es consecuencia de Categoría 4. Como se muestra en el paso 5, la frecuencia como de una descarga fuera del dique es $1 x 10^{-3} / año$. Buscando la consecuencia Categoría 4 y la frecuencia $1 x 10^{-3} / año$ en la matriz de riesgo en la Tabla 14, la acción para reducir el riesgo es “opcional” y “se deben evaluar alternativas”.

MÉTODO MATRICIAL

Para este método, las consecuencias se deben clasificar por el método 1 del paso 1 de la metodología (método de la categoría sin referencia directa al daño humano).

Dado que el escenario requiere una acción opcional y evaluar alternativas, se decide instalar una SIF independiente con $PFD= 1 x 10^{-2}$ para detectar y evitar el desbordamiento. La selección de la SIF se basa en la reducción del riesgo, factibilidad y costo. Para este escenario la SIF reduce la frecuencia de la descarga de $1 x 10^{-3} / año$ a $1 x 10^{-5} / año$. La matriz de riesgo de la Tabla 14 para una consecuencia categoría la frecuencia de descarga de $1 x 10^{-5} / año$ da como resultado “Ninguna acción adicional”

Tabla 14. Matriz de riesgos con zonas de acción individuales

Categoría de la consecuencia		Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
Frecuencia de la consecuencia (por año) ^a	10 ⁻⁰	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)	Acción inmediata (notificar a la gerencia corporativa)	Acción inmediata (notificar a la gerencia corporativa)
	10 ⁻¹	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)	Acción inmediata (notificar a la gerencia corporativa)
	10 ⁻²	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)
	10 ⁻³	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)	Acción en la siguiente oportunidad (notificar a la gerencia corporativa)
	10 ⁻⁴	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)	Opcional (evaluar alternativas)
	10 ⁻⁵	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Opcional (evaluar alternativas)
	10 ⁻⁶	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional
	10 ⁻⁷	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional	Ninguna acción adicional

* Por ejemplo, 10⁻² equivale a 1/100 años

CRITERIOS NUMÉRICOS

Las consecuencias se deben primero clasificar por el método 3 del paso 1 de la metodología.

La LIC del tanque falla, el derrame no es contenido por el dique, y el derrame se dispersa y eventualmente se enciende. Como se muestra en el paso 5, la frecuencia del incendio fuera del dique es 1×10^{-3} /año, y la frecuencia con la que este escenario resulta en una lesión fatal es 2.5×10^{-4} /año. Obtenidos los valores, el siguiente paso es comparar el riesgo existente con los criterios de tolerancia al riesgo de la compañía. Para este ejemplo, se han adoptado los siguientes:

- Riesgo máximo tolerable de un incendio = 1×10^{-4} /año
- Riesgo máximo tolerable de una lesión fatal = 1×10^{-5} /año

El escenario no cumple con los criterios adoptados, por consiguiente se requiere mitigación adicional. Están disponibles varias opciones, incluyendo la adición de uno o más controles BPCS, adición de controles administrativos y/o adición de SIF.

La adición de un control BPCS con un índice de falla de 1×10^{-1} /año resulta en un escenario que cumple con los criterios de tolerancia al riesgo para un incendio pero también presentaría un elemento de falla de causa común, debido a que todos los instrumentos BPCS dependen de un resolovedor lógico único. Tampoco el resultado cumpliría con los criterios de tolerancia al riesgo para una lesión fatal. La adición de controles administrativos tendría efectos similares, dado que un control administrativo normalmente tiene una PFD de alrededor de 1×10^{-1} . Esto también involucraría algunas consideraciones de causa común debido al número limitado de personal disponible para llevar a cabo controles administrativos. Para cumplir con los criterios de fatalidad para el escenario, la PFD de las IPL's añadidas necesitaría ser 1×10^{-2} . Un diseño SIF (interlock) está disponible para una PFD de 1×10^{-2} , por consiguiente, se recomienda la instalación de una SIF independiente de PFD = 1×10^{-2} para mitigación del escenario. Esto resulta en frecuencias finales mitigadas de:

$$f_1^{incendio} = \frac{1x10^{-3}}{año} x (1x10^{-2} SIF PFD) = 1x10^{-5} / año$$

$$f_1^{fatalidad} = \left(\frac{2.5x10^{-4}}{año} \right) x (1x10^{-2} SIF PFD) = 2.5x10^{-6} / año$$

Debe notarse que existen otros métodos de mitigación posibles que reduciría el escenario por debajo de los criterios de tolerancia al riesgo, pero la mayoría involucra algún grado de falla de causa común o costo adicional.

MÉTODO DE NUMERO DE CRÉDITOS IPL

Antes de emplear este método las consecuencias se deben clasificar utilizando el Método de Estimaciones Cualitativas con Daño Humano con Ajustes (método 3).

Como se muestra en el paso 5, multiplicando la frecuencia del evento inicial de este escenario (1×10^{-1} /año) por los factores de ajuste (probabilidad de ignición,

probabilidad de ocupación y probabilidad de fatalidad) resulta en una frecuencia ajustada de evento inicial de 2×10^{-2} /año.

El siguiente paso es comparar las frecuencias del evento inicial para el escenario con los valores en la Tabla 10 para determinar el número de créditos IPL requerido. Esto resulta en los siguientes requerimientos:

El escenario requiere 2 créditos IPL pero no hay que olvidar que cuenta con una IPL (muro dique con PDF de 1×10^{-2} o 1 crédito IPL), esto resulta en IPL adicional: $2-1 = 1$ crédito adicional.

En conclusión el escenario de estudio se recomienda una SIF con PFD de 1×10^{-2} (entre un SIL 1 y SIL 2), añadiendo un sensor independiente de alto nivel que activa una válvula de bloqueo independiente (ver figura 22).

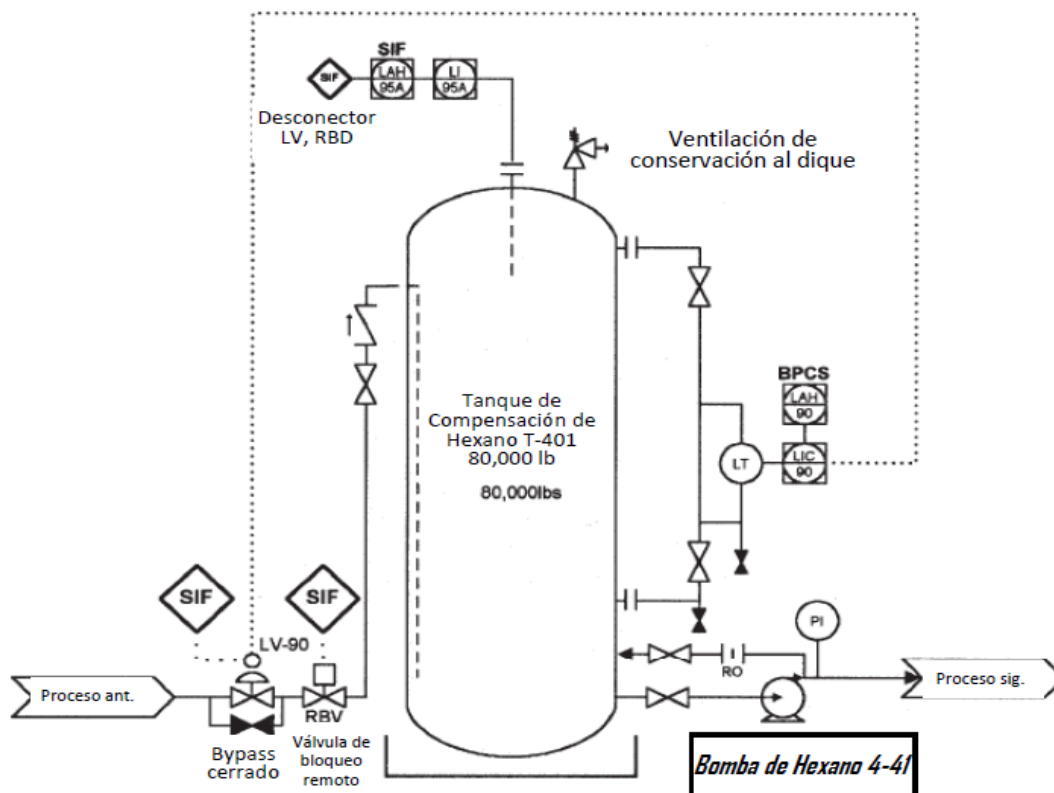


Figura 22 Desbordamiento de Tanque de Compensación de Hexano (con IPL añadido)

Tabla 15. Hoja resumen para el ejemplo, empleando el método de criterios numéricos y el método de criterios de frecuencia de fatalidad para las consecuencias

Número de escenario 1	Número de Equipo	Título del Escenario: Desbordamiento del Tanque de Compensación de Hexano. Derrame no contenido por el dique.	
Fecha:	Descripción	Probabilidad	Frecuencia (por año)
Descripción/Categoría de la consecuencia	Descarga de hexano fuera del dique debido al desbordamiento del tanque y falla del dique con potencial de ignición y fatalidad.		
Criterios de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)	Riesgo máximo tolerado de un incendio serio Riesgo máximo tolerado de una lesión fatal		$< 1 \times 10^{-4}$ $< 1 \times 10^{-5}$
Evento Inicial (Normalmente una Frecuencia)	Falla del lazo de LIC BPCS. (PFD de la Tabla B-1		1×10^{-1}
Condición o Evento Habilitador			
Modificadores de la Condición (Si aplica)			
	Probabilidad de ignición	1	
	Probabilidad de personal afectado en el área	0.5	
	Probabilidad de lesión fatal	0.5	
	Otros	N/A	
Frecuencia de Consecuencia no Mitigada			2.5×10^{-2}
Capas de Protección Independientes	Dique (existente)	1×10^{-2}	
	SIF (por añadirse- ver acciones)	1×10^{-2}	
Salvaguardas (no IPLs)	Acción humana no es una IPL ya que depende de alarmas generadas por BPCS. No puede usarse ya que la falla BPCS es el evento inicial		
PFD total para todos los IPLs		1×10^{-4}	
Frecuencia de Consecuencias Mitigadas			2.5×10^{-6}
¿Se Cumplieron los Criterios de Tolerancia al Riesgo? (Sí/No): Sí, con la SIF añadida			
Acciones Requeridas para Cumplir con los Criterios de Tolerancia al Riesgo:	Añadir SIF con PFD de 1×10^{-2} . Persona/grupo responsable: Tecnicos de Planta Mantener el dique como una IPL (inspercciones, mantenimiento,etc.)		
Notas:	Añadir acciones a la base de datos de rastreo de acciones		
Referencias (ligas para revisión de riesgos originales, PFD, P&ID, etc.):			
Analista del LOPA (y miembros del equipo, si aplica):			

6. CONCLUSIÓN

La metodología LOPA es de suma importancia, debido a que puede ser empleada para llevar a cabo el ciclo de la administración del riesgo, que a su vez es fundamental por la relación tan estrecha con la seguridad industrial y la protección ambiental, tres disciplinas complementarias que las industrias han adoptado como parte de su filosofía corporativa para la toma de decisiones.

El método LOPA provee información semicuantitativa, sobre los principales riesgos, su aceptabilidad en la toma de decisiones y planeación para la prevención, eliminación o control de los mismos para mejorar la seguridad de las operaciones contribuyendo al cumplimiento de normas, reglamentos y leyes en nuestro país.

Una desventaja de la metodología es que no sugiere que capas de protección se deben añadir, por lo que la experiencia y el conocimiento sobre los procesos son factores importantes para los analistas que desean emplear el método, de no ser esto, la técnica no cumpliría con el objetivo principal, ayudar a juzgar varias alternativas de mitigación del riesgo.

Por otra parte, la metodología en cuestión puede ser empleada efectivamente en cualquier etapa del ciclo de vida del proceso, determina un SIL apropiado para Funciones Instrumentadas de Seguridad, establece los requerimientos mínimos para considerar una barrera de protección independiente e identifica equipos críticos que pueden afectar el proceso para desarrollar pruebas, inspecciones y mantenimientos específicos.

A comparación de otras técnicas para elaborar estudios de riesgo, el método LOPA es una herramienta que pueda ser aplicado para problemas simples o complejos dando buenos resultados para la toma de decisiones. Para obtener su máximo beneficio, se deben contar con criterios de tolerancia al riesgo ya establecidos por la organización que desea implementarlo.

ANEXO A. CRITERIOS DE TOLERANCIA AL RIESGO

Tabla A-1. Consecuencias en forma descriptiva

Tipo de evento y categoría de la consecuencia				
Afectación:	Menor C1	Moderado C2	Grave C3	Catastrófico C4
A las personas				
Seguridad y salud de los vecinos	Sin afectación a la seguridad y la salud pública	Alerta vecinal; afectación potencial a la seguridad y la salud pública	Evacuación; Lesiones menores o afectación a la seguridad y salud pública moderada; costos por afectaciones y daños entre 5 y 10 millones de pesos	Evacuación; lesionados; una o más fatalidades; afectación a la seguridad y salud pública; costos por lesiones y daños mayores a 10 millones de pesos
Seguridad y salud del personal y proveedor y/o contratista	Sin lesiones; primeros auxilios	Atención Médica; Lesiones menores sin incapacidad; efectos a la salud reversibles	Hospitalización; múltiples lesionados, incapacidad parcial o total temporal; efectos moderados a la salud	Una o más fatalidades; Lesionados graves con daños irreversibles; Incapacidad parcial o total permanentes
Al ambiente				
Efectos en el Centro de Trabajo	Olores desagradables; ruidos continuos; emisiones en los límites de reporte; polvos y partículas en el aire	Condiciones peligrosas; informe a las autoridades; emisiones mayores a las permitidas; polvos, humos, olores significantes	Preocupación en el sitio por: fuego y llamaradas; ondas de sobre presión; fuga de sustancias tóxicas	Continuidad de la operación amenazada; incendios, explosiones o nubes tóxicas; evacuación del personal.
Efectos fuera del Centro de Trabajo	Operación corta de quemadores; olores y ruidos que provocan pocas quejas de vecinos	Molestias severas por presencia intensa de humos, partículas suspendidas y olores; quemadores operando continuamente; ruidos persistentes y presencia de humos	Remediación requerida; fuego y humo que afectan áreas fuera del centro de trabajo; Explosión que tiene efectos fuera del centro de trabajo; presencia de contaminantes significativa	Descargas mayores de gas o humos. Evacuación de vecinos, escape significativo de agentes tóxicos; daño significativo a largo plazo de la flora y fauna ó repetición de eventos mayores
Descargas y Derrames	Derrames y/o descarga dentro de los límites de reporte; contingencia controlable.	Informe a las Autoridades. Derrame significativo en tierra hacia ríos o cuerpos de agua. Efecto local. Bajo potencial para provocar la muerte de peces.	Contaminación de un gran volumen de agua. Efectos severos en cuerpos de agua; mortandad significativa de peces; incumplimiento de condiciones de descarga permitidas; reacción de grupos ambientalistas.	Daño mayor a cuerpos de agua; se requiere un gran esfuerzo para remediación. Efecto sobre la flora y fauna. Contaminación en forma permanente del suelo o del agua
Al negocio				
Pérdida de producción, daños a las instalaciones	Menos de una semana de paro. Daños a las instalaciones y pérdida de la producción, menor a 5 millones de pesos	De 1 a 2 semanas de paro. Daños a las instalaciones y pérdida de la producción, hasta 10 millones de pesos	De 2 a 4 semanas de paro. Daños a las instalaciones y pérdida de la producción de hasta 20 millones de pesos	Más de un mes de paro. Daños a propiedades o a las instalaciones; pérdida mayor a 20 millones de pesos
Efecto legal	Incidente reportable	Se da una alerta por parte de las Autoridades	Multas significativas; suspensión de actividades	Multa mayor, proceso judicial
Daños en propiedad de terceros	Las construcciones son reutilizables, con reparaciones menores. Poco riesgo para los ocupantes	Las reparaciones son mayores, con costos similares a edificaciones nuevas. Riesgo de alguna lesión a ocupantes	Pérdida total de los bienes o de la funcionalidad de los bienes; posibilidad de lesiones o fatalidades	Demolición y reedificación de inmuebles; sustitución del edificio. Posible lesión fatal a algún ocupante
A la imagen				
Atención de los medios al evento	Difusión menor del evento, prensa y radio locales	Difusión local significativa; entrevistas, TV local	Atención de medios a nivel nacional	Cobertura nacional. Protestas públicas. Corresponsales extranjeros

Tabla A-2. Tabla para estimar la frecuencia de ocurrencia de los eventos en forma descriptiva

Frecuencia de ocurrencia de los eventos				
Factores:	Remota F1	Baja F2	Media F3	Alta F4
Controles de Ingeniería				
Barreras de protección	Dos o más sistemas pasivos de seguridad independientes entre sí. Los sistemas son confiables; no requieren intervención del personal o de fuentes de energía	Dos o más sistemas, al menos uno de ellos pasivo. Todos son confiables	Uno o dos sistemas activos y complejos. La confiabilidad de los sistemas, pueden tener fallas de causa común; que de ocurrir puede afectar a los sistemas	Ningún sistema o uno activo y complejo; poco confiable
Pruebas (Interruptor, integridad mecánica y sistemas de emergencia)	Protocolos de prueba bien documentados; función verificada completamente; buenos resultados; fallas raras	Pruebas regulares; la verificación de funcionamiento puede estar incompleta; los problemas no son comunes	No se prueban a menudo; se registran problemas, algunas pruebas programadas no son realizadas	No están definidas; no se realizan ó no se aprecia su importancia
Antecedentes de accidentes e incidentes	No se registran accidentes graves, muy pocos incidentes y todos menores. Cuando se presentan, la respuesta es con acciones correctivas rápidas	No se presentan accidentes o incidentes graves. Se dan algunos accidentes/incidentes menores. Las causas raíz han sido identificadas y las lecciones son capitalizadas	Un accidente o incidente menor. Sus causas no fueron totalmente entendidas. Hay dudas de si las medidas correctivas fueron las correctas	Muchos incidentes y/o accidentes. No se investigan y registran. Las lecciones no son aprendidas
Experiencia operacional	Los procesos son bien entendidos. Rara vez se rebasan los límites de operación y cuando esto ocurre, se toman acciones inmediatas para volver a condiciones normales	Rara vez se rebasan los límites de operación. Cuando esto ocurre, las causas son entendidas. Las acciones correctivas resultan efectivas	Transitorios operacionales menores, no son analizados o no se toman acciones para su control. Transitorios serios, son atendidos y eventualmente resueltos	Transitorios rutinarios, no son analizados ni explicados. Sus causas no son bien entendidas
Administración de Cambios	En cuanto a cambios, el proceso es estable; Los peligros potenciales asociados son bien entendidos. La información para operar dentro de los límites y condiciones seguras, siempre está disponible	El número de cambios es razonable. Puede haber nuevas tecnologías, sobre las que se tenga alguna incertidumbre. Buenos análisis de riesgos de los procesos	Cambios rápidos ó aparición de nuevas tecnologías. Los análisis de riesgos de los procesos son superficiales. Incertidumbre sobre los límites de operación	Cambios frecuentes. Tecnología cambiante. Análisis de riesgos incompletos o de pobre contenido técnico. Se aprende sobre la marcha
Factores Humanos				
Entrenamiento y procedimientos	Instrucciones operativas claras y precisas. Disciplina para cumplirlas. Los errores son señalados y corregidos en forma inmediata. Reentrenamiento rutinario, incluye operaciones normales, transitorios operacionales y de respuesta a emergencias. Todas las contingencias consideradas	Las instrucciones operativas críticas son adecuadas. Otras instrucciones operativas, tienen errores o debilidades menores. Auditorías y revisiones rutinarias. El personal esta familiarizado con la aplicación de los procedimientos	Existen instrucciones operativas. Estas instrucciones no son revisadas ni actualizadas de forma regular. Entrenamiento deficiente sobre los procedimientos para la respuesta a emergencias	Las instrucciones operativas se consideran innecesarias; el "entrenamiento" se da por transmisión oral; los manuales de operación sin control; demasiadas instrucciones verbales en la operación; sin entrenar para la respuesta a emergencias
Habilidades y desempeño de operadores, personal de mantenimiento, supervisores y proveedores y/o contratistas	Múltiples operadores con experiencia en todos los turnos. El trabajo o aburrimiento no son excesivos. Nivel de estrés óptimo. Personal bien calificado. Clara dedicación y compromiso con su trabajo. Personal sin capacidades disminuidas. Los riesgos son claramente comprendidos y evaluados	El personal nuevo nunca está solo en cualquier turno. Fatiga ocasional. Algo de aburrimiento. El personal sabe que hacer de acuerdo a sus calificaciones y sus limitaciones. Respeto por los riesgos identificados en los procesos	Posible turno donde el personal es novato o sin mucha experiencia., pero no es muy común que esto ocurra. Periodos cortos de fatiga y aburrimiento para el personal. No se espera que el personal razone. El personal asume ideas más allá de sus conocimientos. Nadie comprende los riesgos	Alta rotación de personal. Uno o más turnos con personal sin experiencia. Exceso de horas de trabajo, la fatiga es común. Programas de trabajo agobiantes. Moral baja. Trabajos realizados por personal con poca habilidad. Los alcances del trabajo no están definidos. No existe conciencia de los riesgos

Tabla A-3. Tabla para estimar la frecuencia de ocurrencia de los eventos en forma gráfica

Frecuencia		Criterios de ocurrencia		
Categoría	Tipo	Cuantitativo		Cualitativo
Alta	F4	$> 10^{-1}$	>1 en 10 años	El evento se ha presentado o puede presentarse en los próximos 10 años
Media	F3	$10^{-1} - 10^{-2}$	1 en 10 años a 1 en 100 años	Puede ocurrir al menos una vez en la vida de las instalaciones
Baja	F2	$10^{-2} - 10^{-3}$	1 en 100 años a 1 en 1000 años	Concebible; nunca ha sucedido en el centro de trabajo, pero probablemente ha ocurrido en alguna instalación similar
Remota	F1	$< 10^{-3}$	<1 en 1000 años	Esencialmente imposible. No es realista que ocurra

Tabla A-4. Datos típicos relacionados con criterios de tolerancia al riesgo (todos los valores tienen unidades de probabilidad de muerte por año para un individuo)

Datos generalizados de la industria de USA	Riesgo para mano de obra de todos los escenarios	Riesgo para el público de todos los escenarios
Alto riesgo (por ejemplo, la minería, la construcción pesada)	10^{-3}	10^{-3} a 10^{-5}
Bajo riesgo (por ejemplo, ingeniería, servicios)	10^{-5}	10^{-5}
La industria en general (química, fabricación, transporte por ferrocarril, transporte por carretera)	10^{-4}	10^{-4} a 10^{-5}
Datos estadísticos de USA.	Riesgo de mano de obra de todos los escenarios, derivado de dividir muertes aplicables entre la población afectada	Riesgo para el público de todos los escenarios, derivado de dividir muertes aplicables entre la población afectada
Accidentes automovilísticos	10^{-4}	10^{-4}
Accidentes aéreos	5×10^{-7}	4×10^{-6}
Trabajos relacionados con el trabajo en la industria de EUA	1.9×10^{-5}	NA
Todos los accidentes en EUA (en el trabajo y no laboral)	3.5×10^{-4}	3.5×10^{-4}

NA: Significa que no está disponible o no aplica

ANEXO B. VALORES DE FRECUENCIA PARA EVENTOS INICIALES

Tabla B-1. Valores típicos de frecuencia, f, asignados para eventos iniciales

Evento Inicial	Rango de Frecuencia de la literatura (por año)	Ejemplo de un Valor Elegido por una Compañía para Uso en el LOPA (Por año)
Falla residual en el contenedor a presión	10^{-5} a 10^{-7}	1×10^{-6}
Falla residual en la tubería – 100 m – ruptura completa	10^{-5} a 10^{-6}	1×10^{-5}
Fuga en la tubería (Sección 10%) – 100 m	10^{-3} a 10^{-4}	1×10^{-3}
Falla en tanque atmosférico	10^{-3} a 10^{-5}	1×10^{-3}
Reventón del tapó / empaque	10^{-2} a 10^{-6}	1×10^{-2}
Sobrevolución de la máquina diesel/turbina con ruptura del revestimiento	10^{-3} a 10^{-4}	1×10^{-4}
Intervención de terceros (impacto externo por retroexcavadora, vehículo, etc.)	10^{-2} a 10^{-4}	1×10^{-2}
Caída de la carga de la grúa	10^{-3} a 10^{-4} por levantamiento	1×10^{-6} por levantamiento
Cae un rayo	10^{-3} a 10^{-4}	1×10^{-3}
La válvula de seguridad se abre falsamente	10^{-2} a 10^{-4}	1×10^{-2}
Falla en el agua de enfriamiento	1 a 10^{-2}	1×10^{-1}
Falla en el sello de la bomba	10^{-1} a 10^{-2}	1×10^{-1}
Falla en la manguera de carga/descarga	1 a 10^{-2}	1×10^{-1}
Falla en el lazo instrumental BPCS. <i>Nota:</i> El límite IEC 61511 es mayor que 1×10^{-5} /hr o 8.76×10^{-2} /yr (IEC, 2001)	1 a 10^{-2}	1×10^{-1}
Falla del regulador	1 a 10^{-1}	1×10^{-1}
Incendio externo pequeño (causas acumuladas)	10^{-1} a 10^{-2}	1×10^{-1}
Incendio externo grande (causas acumuladas)	10^{-2} a 10^{-3}	1×10^{-2}
Falla en procedimiento LOTO (bloqueo y etiquetado)* falla total o de un proceso de elementos múltiples	10^{-3} a 10^{-4} por oportunidad	1×10^{-3} por oportunidad
Falla del operador (para ejecutar procedimientos de rutina, suponiendo que está bien capacitado, desestresado, no fatigado)	10^{-1} a 10^{-3} por oportunidad	1×10^{-2} por oportunidad

Nota: Deben elegir sus propios valores, que sean consistentes con el grado de conservadurismo de los criterios de tolerancia al riesgo de la compañía.

ANEXO C. SALVAGUARDAS QUE NO SE CONSIDERAN IPL'S

Tabla C-1. Ejemplos de salvaguardas que usualmente no se consideran IPLs

Salvaguarda usualmente no consideradas como IPLs	Comentarios
Capacitación y Certificación	Estos factores pueden considerarse para evaluar la PFD para acción del operador, pero no son IPLs por sí mismas.
Procedimientos	Estos factores pueden considerarse para evaluar la PFD para acción del operador, pero no son IPLs por sí mismas.
Pruebas e inspección normal	Se supone que estas actividades se establecen para todas las evaluaciones de riesgos y sienta las bases de juicio para determinar la PFD. Las pruebas e inspección normal afectan la PFD de ciertas IPLs. Alargar los intervalos de pruebas e inspección puede incrementar la PFD de una IPL.
Mantenimiento	Se supone que esta actividad se establece para todas las formas de evaluaciones de riesgos y sienta las bases de juicio para determinar la PFD. El mantenimiento afecta la PFD de ciertos IPLs.
Señales	Las señales por sí mismas no son IPLs. Las señales pueden ser oscuras, ignoradas, no claras, etc. Las señales pueden afectar la PFD de ciertas IPLs.
Protección contra Incendio	<p>La protección activa contra incendios a menudo no se considera como una IPL dado que es post-evento para la mayoría de los escenarios y su disponibilidad y efectividad puede afectarse por el incendio/explosión que se pretende que contenga. Sin embargo, puede utilizarse si una compañía puede demostrar que cumple con los requerimientos de una IPL para un escenario dado (por ej. si se utiliza un sistema de activación como una tubería plástica o apagadores frágiles).</p> <p><i>Nota:</i> La protección contra incendios es una IPL mitigadora ya que pretende evitar una consecuencia mayor subsecuente a un evento que ya haya ocurrido.</p> <p>Se puede utilizar aislamiento contra incendios como una IPL para algunos escenarios siempre y cuando cumple con los requerimientos de una IPL y los estándares corporativos.</p>
Requerimiento que la información esté disponible y se entienda	Este es un requerimiento básico.

Nota: La mala actuación de las áreas discutidas en esta tabla puede afectar el proceso de seguridad de toda la planta y así afectar muchas de los supuestos contenidos en el proceso LOPA.

ANEXO D. VALORES DE PROBABILIDAD DE FALLA EN LA DEMANDA (PFD) PARA ALGUNAS IPL's

Tabla D-1. IPL's Pasivas

IPL	Comentarios <i>Suponiendo una base de diseño adecuada y procedimientos de inspección y mantenimiento adecuados</i>	PFD a partir de la Literatura e Industria	PFD Utilizada (Para valoración inicial)
Dique	Reducirá la frecuencia de una consecuencia grande (derrame generalizado) del desborde/ruptura/derrame, etc. de un recipiente	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}
Sistema de drenaje bajo suelo	Reducirá la frecuencia de una consecuencia grande (derrame generalizado) del desborde/ruptura/derrame, etc. de un recipiente	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}
Ventilación abierta (no válvula)	Evitará sobrepresión	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}
Protección contra incendios	Reducirá el índice de inducción de calor y provee tiempo adicional para despresurizar/combatar incendio, etc.	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}
Muro contra explosión / bunker	Reducirá la frecuencia de una consecuencia grande de una explosión confinando la explosión y protegiendo el equipo/edificios/etc.	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}
Diseño "inherentemente más seguro"	Si se implementa apropiadamente, puede reducir significativamente la frecuencia de consecuencias asociadas con un escenario. Nota: las reglas del LOPA para algunas compañías permiten funciones de diseño inherentemente más seguro para eliminar ciertos escenarios (por ej. el diseño de presión del contenedor excede todos los posibles desafíos de alta presión).	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-6}$	1×10^{-2}
Supresores de fuego/detonación	Si se diseñan, instalan y mantienen apropiadamente, éstos pueden eliminar el potencial de retroceso a través de un sistema de tuberías o en un contenedor o tanque.	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}

Tabla D-2. IPL's Activas

IPL	Comentarios <i>Suponiendo una base de diseño y procedimientos de inspección/mantenimiento adecuado</i>	PFD de la literatura e industria	PFD utilizada (para valoración inicial)
Válvula de alivio	Evita que el sistema exceda una sobrepresión específica. La efectividad de este dispositivo es sensible al servicio y experiencia.	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-2}
Disco de ruptura	Evita que el sistema exceda la sobrepresión específica. La efectividad puede ser muy sensible al servicio y la experiencia.	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$	1×10^{-1}
Sistema Básico de Control de Proceso	Puede acreditarse como una IPL si no se asocia con el evento inicial que se considera ver el IEC 61508 e IEC 61511 para discusión adicional.)	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$ ($>1 \times 10^{-1}$ permitido por el IEC)	1×10^{-1}
Funciones Instrumentadas De Seguridad (Interlocks)	Ver IEC 61597 e IEC 61511 para requerimientos de ciclo de vida y discusión adicional.		
SIL 1	Normalmente consiste en: Sensor individual (redundante para tolerancia a la falla) Procesador lógico individual (redundante para la tolerancia a la falla) Elemento final individual (redundante para la tolerancia a la falla)	$\geq 1 \times 10^{-2} - < 1 \times 10^{-1}$	Se calcula la PFD requerida para una SIF
SIL 2	Normalmente consiste en: Sensores "múltiples" (para tolerancia a la falla) Procesador de canal lógico "múltiple" (para tolerancia a la falla) Elementos finales "múltiples" (para falla a la tolerancia)	$\geq 1 \times 10^{-3} - < 1 \times 10^{-2}$	
SIL 3	Normalmente consiste en: Sensores múltiples Procesadores de canal lógico múltiples Elementos finales múltiples	$\geq 1 \times 10^{-4} - < 1 \times 10^{-3}$	

Nota: Múltiple incluye 1 de 2 y 2 de 3 inspecciones en los esquemas

"Múltiple" indica que varios componentes pueden o no requerirse dependiendo de la arquitectura del sistema, los componentes seleccionados y el grado de tolerancia a la falla requerido para alcanzar la PFD general requerida y para minimizar interrupciones innecesarias por falla de componentes individuales (Ver IEC 61511 para guía y requerimientos).

Tabla D-3. IPL's para Acción Humana

IPL	Comentarios <i>Suponiendo documentación, capacitación y pruebas adecuadas</i>	PFD de la literatura e industria	PFD Utilizada en Este Libro (Para valoración inicial)
Acción humana con 10 minutos de tiempo de respuesta	Acción simple bien documentada con indicaciones claras y confiables de que se requiere la acción	$1.0 - 1 \times 10^{-1}$	1×10^{-1}
Respuesta humana al indicador BPCS o alarma con 40 minutos de tiempo de respuesta	Acción simple bien documentada con indicaciones claras y confiables de que se requiere la acción. (la PFD es limitada por IEC 61511)	1×10^{-1} ($>1 \times 10^{-1}$ permitida por IEC)	1×10^{-1}
Acción humana con 40 minutos de tiempo de respuesta	Acción simple bien documentada con indicaciones claras y confiables de que se requiere la acción	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$	1×10^{-1}

GLOSARIO

Accidente. Evento o combinación de eventos no deseados e inesperados que tienen consecuencias tales como lesiones al personal, daños a terceros en sus bienes o en sus personas, daños al medio ambiente, daños a instalaciones o alteración a la actividad normal del proceso.

Administración de Riesgo. Arte y ciencia de identificar, analizar, evaluar y responder a los riesgos del proyecto a lo largo del ciclo de vida de éste, en beneficio de sus objetivos. Se le llama ciencia porque se basa en principios científicos y aplica lineamientos con base racional, es arte porque interviene en ella el juicio, la habilidad y la experiencia para percibir los posibles eventos de riesgo y responder a ellos en forma adecuada.

Análisis de Riesgo en Procesos. Conjunto de técnicas que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de la ocurrencia de daños asociados a los factores externos (fenómenos naturales, sociales), fallas en los sistemas de control, los sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias a los empleados, a la población, al ambiente, a la producción y/o a las instalaciones.

BLEVE. Explosión de Vapor en Expansión por Líquido en Ebullición.

Capa de Protección Independiente (IPL). Es un dispositivo, sistema, o acción que es capaz de evitar que un escenario procese a su consecuencia indeseable independientemente del evento inicial o la acción de cualquier otra capa de protección asociada al escenario, si ésta opera conforme a lo esperado, la consecuencia indeseable se evita, si todas las IPLs en un escenario fallan en realizar su función, entonces la consecuencia indeseable ocurrirá a continuación del evento inicial.

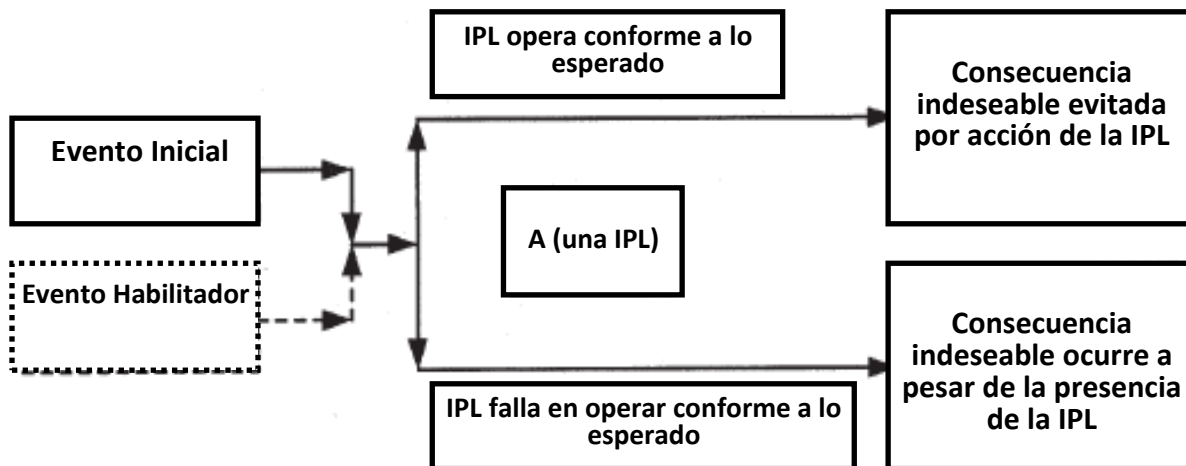


Figura 23. Efecto de una IPL que falla en operar como se pretendía

La efectividad de una IPL se califica en términos de su probabilidad de falla en la demanda (PFD).

Nota: Todas las IPL's son salvaguardas, pero no todas las salvaguardas son IPL's.

Causa raíz. Es una razón subyacente relacionada con el sistema (la más básica) por la que ocurre un incidente.

Consecuencia. Resultado real o potencial de un evento no deseado, medido por sus efectos esperados de un evento.

Efectos Físicos. Flujo de radiación proveniente de los incendios, las sobrepresiones provenientes de las explosiones, y las concentraciones tóxicas provenientes de descargas tóxicas.

Escenario. Evento no planeado o una consecuencia de eventos que resultan en un impacto indeseable. Cada escenario consiste en al menos dos elementos:

- Un evento inicial que inicia la cadena de eventos y
- Una consecuencia que resulta si la cadena de eventos continúa sin interrupción.

Adicionalmente al evento inicial y la consecuencia, un escenario también puede incluir:

- Eventos o condiciones habilitadoras que tienen que ocurrir o estar presentes antes de que el evento inicial pueda resultar en una consecuencia, éstas se expresan en probabilidades
- Falla de salvaguardas que pueden ser IPLs (alarmas, intervención de un operador, ventilación manual, SIF's, etc.)

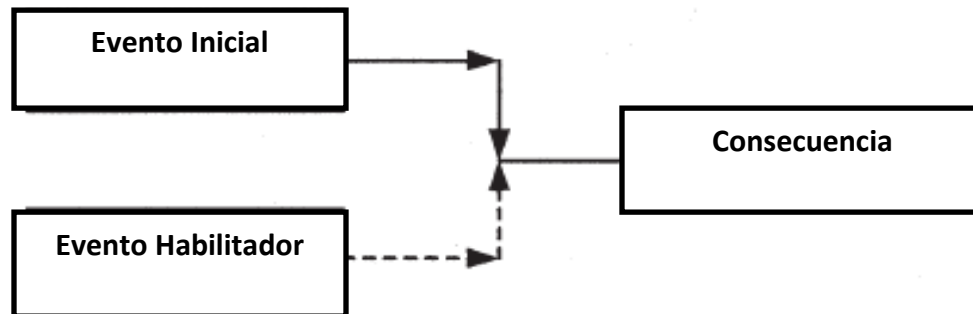


Figura 24. Evento inicial y habilitador coincidente

Ejemplificación de un escenario donde existe una reacción exotérmica desenfrenada en un reactor tipo batch y una sobrepresión.

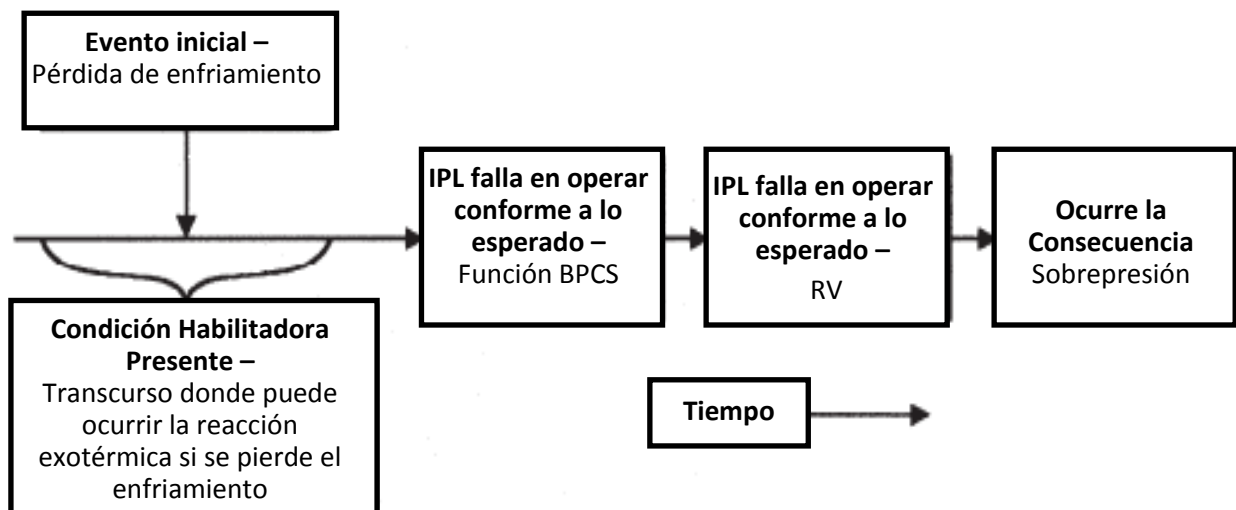


Figura 25. Escenario de un reactor tipo batch

Evento. Suceso relacionado a las acciones del ser humano, al desempeño del equipo o con sucesos externos al sistema que pueden causar interrupciones y/o problemas en el sistema.

Eventos iniciales. Son el resultado de varias causas raíz subyacentes como eventos externos, fallas en el equipo, o fallas humanas.

Nota: Las Causas raíz no son lo mismo que los eventos iniciales, las causas raíz pueden contribuir a determinar la frecuencia de la ocurrencia del evento inicial.

Falla de causa común (CCF). Es la falla de más de un componente, pieza o sistema debido a la misma causa o evento inicial.

Frecuencia. Número de ocasiones en que puede ocurrir o se estima que ocurra un evento en un lapso de tiempo.

Función Instrumentada de Seguridad (SIF). Es una combinación de sensores, resolvidores lógicos, y elementos finales con un nivel de integridad de seguridad específico que detecta una condición fuera de límites (anormal) y que lleva al proceso a un estado funcionalmente seguro sin intervención humana.

Incidente. Evento no deseado, inesperado e instantáneo, que puede o no traer consecuencias al personal y a terceros, ya sea en sus bienes o en sus personas, al medio ambiente, a las instalaciones o alteración a la actividad normal de proceso.

Integridad mecánica. Conjunto de actividades interrelacionadas enfocadas para asegurar la confiabilidad de los equipos críticos para que sea mantenida durante toda la vida de la instalación. Cubre desde la fase de diseño, fabricación, instalación, construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento, para garantizar que el equipo cumpla las condiciones de funcionamiento requeridas, con el propósito de proteger a los trabajadores e instalaciones del centro de trabajo.

Mitigar. Acto de causar una consecuencia a ser menos grave.

Nivel de Integridad de Seguridad (SIL). Criterio de rendimiento para una SIF, define la probabilidad de que no lleve a cabo su función cuando sea requerida.

Peligro. Es cualquier condición física, química o biológica que tiene el potencial de causar daño al personal, a las instalaciones o al ambiente.

Probabilidad. Predicción calculada de la ocurrencia de un evento o una secuencia de eventos durante un cierto periodo de tiempo, este valor se expresa como un número adimensional entre 0 y 1.

Probabilidad de Falla en la Demanda (PFD). Se define como la probabilidad de que un sistema (en este caso la IPL) no realice una función específica para la cual fue diseñada y en consecuencia, el escenario continuará hacia la consecuencia indeseable a pesar de la presencia de esa IPL. La PFD es un número adimensional entre 0 y 1.

Riesgo. Es el peligro cuantificado, es decir $\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$

Salvuardas. Es cualquier dispositivo, sistema o acción que probablemente interrumpiría la cadena de eventos, después de un evento inicial.

Las salvuardas pueden clasificarse como:

- Activa o Pasiva (por ejemplo diques, muros anti-exposición, válvulas de alivio)
- Preventiva o mitigadora (por ejemplo Integridad mecánica)

Nota: No confundir Salvuardas con IPL's.

Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS). Es una combinación de sensores, resolvidores lógicos y elementos finales que acciona una o más funciones instrumentadas de seguridad (SIF's).

Sistema de Control de Proceso Básico (BPCS). Sistema que responde a las señales de entrada del proceso y/o de un operador, y genera señales de salida, haciendo que el proceso opere de la manera deseada. El BPCS consiste en una combinación de sensores, solucionadores lógicos, controladores de proceso, y los elementos finales de control que regulan automáticamente el proceso dentro de los límites normales de producción.

Se consideran dos tipos de sistemas de control:

- Controlador continuo (por ej. el controlador de proceso que regula el flujo, la temperatura, o presión a un valor establecido por el operador) provee

retroalimentación continua al operador de que está funcionando normalmente

- Controlador de estado (el resolvidor lógico toma medidas de proceso y ejecuta cambios encendido-apagado a indicadores de alarma y a válvulas del proceso) monitorea las condiciones de la planta y únicamente toma acciones de control cuando se alcanzan puntos de interrupción predefinidos

Tanto controladores continuos como de estado se encuentran en el BPCS y el SIS. El BPCS y el SIS difieren significativamente en el nivel de reducción de riesgo alcanzable.

REFERENCIAS

- [1]. Dr. Sam Mannan, "Lee's Loss Prevention in the Process Industries" Volume 1 EUA, Elsevier, 2005.
- [2]. Memoria estadística IMSS 2012.
- [3]. Occupational Safety and Health Administration OSHA, Informational Booklet No. 3132 "Process Safety Management" (2000).
- [4]. Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", New York, 1992.
- [5]. Norma de Referencia NRF-018-PEMEX-2007, Estudios de Riesgo.
- [6]. Norma Oficial Mexicana NOM-028-STPS-2004, Organización del Trabajo-Seguridad en los procesos de sustancias químicas.
- [7]. Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", New York, 1999.
- [8]. Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", New York, 2000.
- [9]. Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), "Layer of Protection Analysis", New York, 2001.
- [10]. International Association of Oil and Gas Producers OGP, Report No. 415, "Asset integrity – the key to managing mayor incidents risks", (2008).
- [11]. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Última reforma publicada DOF 19-07-2013.
- [12]. Ley Federal del Trabajo, Última reforma publicada DOF 30-11-2012.
- [13]. Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Última reforma publicada DOF 02-04-2013.
- [14]. Ley Federal Sobre Metrología y Normalización, Última reforma publicada DOF 09-04-2012.
- [15]. Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo, DOF 21-01-1997.
- [16]. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Última reforma DOF 04-06-2012.

[17]. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Última reforma publicada DOF 07-06-2013.

[18]. Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), "Tools for making acute risk decisions with chemical process safety applications", New York, 1994.

BIBLIOGRAFÍA

- I. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), New York, 1992.
- II. Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry, H.R. Greenberg and J.J.Cramer, New York, 1991.
- III. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety and American Institute of Chemical Engineers (CCPS/AIChE), New York, 2000.
- IV. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, D.A. Crowl and J.F. Louvar, Prentice Hall, 1990
- V. Presentación del Estudio de Riesgo para Empresas que Realizan Actividades Altamente Riesgosas, SEMARNAT-07-008